

Internet of Things en Sistemas de Monitorización Inteligente con Aplicación en Transporte e Infraestructuras



Autor: Eduardo Hidalgo Fort

**Directores: Fernando Muñoz Chavero, Ramón
González Carvajal y José Ramón García Oya**

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

2019



Tesis Doctoral
Ingeniería de Telecomunicación

IoT en Sist. de Monitorización Inteligente con Aplicación en Transporte e Infraestructuras

Autor:

Eduardo Hidalgo Fort

Director:

Fernando Muñoz Chavero

Catedrático de Universidad

Ramón González Carvajal

Catedrático de Universidad

José Ramón García Oya

Profesor de Universidad

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla 2019

Tesis doctoral: IoT en Sist. de Monitorización Inteligente con Aplicación en Transporte e Infraestructuras

Autor: Eduardo Hidalgo Fort

Tutor: Fernando Muñoz Chavero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis estimados Dr. Fernando Muñoz Chavero, Dr. Ramón González Carvajal y Dr. José Ramón García Oya, como directores de Tesis, por darme la oportunidad de enfrentarme a líneas de investigación tan interesantes como las recogidas a lo largo de este trabajo, por su dedicación y su soporte. Gracias a los tres por haberme servido de ejemplo e inspiración, porque, sin vosotros, este trabajo no hubiera sido posible.

Gracias, también, a Dr. Antonio Torralba Silgado que, junto a mis directores de Tesis, me han posibilitado realizar esta Tesis integrado en el Grupo de Ingeniería Electrónica (GIE) al que pertenezco hace 10 años y donde he podido realizarme como Ingeniero e Investigador. A todos mis compañeros: Gracias.

También quisiera dar las gracias al sistema de educación público español y, más concretamente, al entonces Ministerio de Economía y Competitividad, por posibilitar mi formación como doctor a través de las *Ayudas para contratos Predoctorales para la formación de doctores 2014* en el marco del proyecto *Ecosistema Inteligente para un Transporte de Mercancías Sostenible, Seguro e Integrado (ECOTRANSIT)* el cual ha sido financiado por el Plan Estatal Retos 2013-2016.

Gracias a Dr. Rogelio Palomo, Dr. Michael Moll y Dr. Salvatore Pennisi por permitir sendas estancias investigadoras durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral en el *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN - Suiza)* y el Departamento de *ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica* de la *Università degli Studi di Catania* (Italia), respectivamente, las cuales han ayudado significativamente a completar este trabajo.

Por otro lado, no podría finalizar estos agradecimientos sin mencionar a Amigos y especialmente Familia, los cuales me han guiado y acompañado durante todo este proceso, no solo de Tesis, sino de vida.

Por último, el agradecimiento más especial para Irene, mi compañera de vida, por alentarme y hacer que cada día sea un reto maravilloso. Gracias, cariño. Sin ti, nada hubiera sido posible.

Eduardo Hidalgo Fort

Sevilla, 2019

La presente Tesis Doctoral propone la aplicación de la arquitectura del paradigma *Internet of Things* (IoT) como conjunto de tecnologías habilitadoras para satisfacer la demanda de servicios por parte de los usuarios comunes así como de la industria que facilite la vida cotidiana de los primeros y optimice el rendimiento de los procedimientos utilizados por los últimos. Sin embargo, hoy en día, no es posible el despliegue masivo tal y como está concebido IoT debido a la aparición de una serie de retos tecnológicos que han de superarse. Para ello, a lo largo de esta Tesis Doctoral se han seleccionado una serie de campos de aplicación suficientemente relevantes para la sociedad como los sectores del transporte y las infraestructuras. Posteriormente, en base a estos sectores, se identifican varios casos de uso que ponen de manifiesto los retos tecnológicos identificados, los cuales son afrontados con nuevos desarrollos que parten de las aportaciones originales que a continuación se exponen.

Inicialmente se desarrolla un sistema de monitorización inteligente de contenedores de mercancía abierto y de bajo consumo que aporta soluciones a los retos de integrar las distintas magnitudes físicas adquiridas (temperatura, humedad relativa, GPS, etc.), a través de la implementación de una interfaz hardware y software abierta, y de transmitir la información por distintas redes de comunicación (redes locales, móviles o satélite) hasta alcanzar la nube, utilizando distintas interfaces de red que alcanzan un servidor común en la nube. Posteriormente, tras el diseño y desarrollo el sistema se valida en el corredor intermodal Madrid – Sevilla – Canaria donde la cadena de transporte obliga a los contenedores de mercancía a pasar por camión, tren y barco. Sin embargo, este sistema pone de manifiesto la necesidad de comunicar el interior de los contenedores, donde se encuentran alojados los sensores que monitorizan la carga y sus condiciones de viaje y el exterior de los mismos donde se encuentra la interfaz de red, mediante un canal que no implique la perforación de los propios contenedores.

En base a la premisa anterior se lleva a cabo el desarrollo de una interfaz de comunicación por ultrasonidos basada en transceptores piezoeléctricos y una modulación DBPSK, la cual, tras una primera implementación, con el objetivo de minimizar el consumo de potencia y mejorar el ancho de banda, sufre dos actualizaciones que se desarrollan en paralelo. La primera de ellas sustituye el modulador DBPSK analógico por uno puramente digital, basado en la característica de filtro LP que presenta el canal y la utilización de biestables flip-flop y puertas NAND, lo que posibilita disminuir significativamente (dos órdenes de magnitud) el consumo. La segunda actualización utiliza técnicas de submuestreo para sustituir la modulación DBPSK por una OFDM con 128 portadoras D8PSK aprovechando la aparición de una nueva banda de frecuencias con más ganancia y ancho de banda como consecuencia de sustituir la fijación magnética del piezoeléctrico al contenedor por resina epoxi y, por tanto, mejorar la adaptación de impedancias. Los resultados validan la solución desarrollada ya que consigue disminuir el consumo tres órdenes de magnitud e incrementar el ancho de banda de transmisión 20 veces respecto a la implementación original.

Otro de los casos de uso propone el inventario automático de las señales de carretera y la navegación a través de ellas, a lo que se aporta como solución, tras la validación teórica inicial, la utilización de la tecnología RFID pasiva por los beneficios que presenta frente a las tecnologías ópticas utilizadas tradicionalmente (puede utilizarse de noche o en condiciones de baja visibilidad) o frente a RFID pasivo (protocolos propietarios, etiquetas más caras, costes de mantenimiento derivados de las baterías). Los resultados de campo, tal y como demuestra el estudio teórico realizado (incluyendo efecto multitrayecto y lector RFID en movimiento), corroboran la viabilidad de la aplicación de RFID pasivo a dicha aplicación además de posibilitar su utilización en nuevas aplicaciones como el inventario del mobiliario urbano o los sistemas de comunicación I2V.

Por otro lado, se propone un sistema para la monitorización de las correas de los ascensores utilizando reflectometría. Si bien, esto implica la transmisión y procesamiento de una cantidad elevada de datos, con el consumo energético que eso implica, se propone la utilización de técnicas de *Compressive Sensing* para minimizar el número de muestras necesarias para el análisis aunque implica mayor capacidad de cálculo. No obstante, esta es una de las principales ventajas que ofrece IoT y su aplicación resulta en un aumento de la resolución de localización de fallo en las correas del sistema bajo inspección de 70m en el caso original a 9,1cm utilizando *Compressive Sensing*.

Finalmente se desarrolla un sistema de monitorización de salud estructural o *Structural Health Monitoring* (SMH) distribuido, de bajo consumo y bajo coste el cual, a partir de la recogida de las aceleraciones de la estructura en cuestión y la utilización de la capacidad de cálculo proporcionada por IoT, aplica un algoritmo basado en modelos estocásticos autorregresivos (AR-ARX) para diagnosticar la salud de la estructura y detectar daños en caso de que los hubiera, tal y como fue validado en las pruebas experimentales llevadas a cabo sobre los modelos de un puente y un edificio de cinco plantas, respectivamente.

Por tanto, la presente Tesis Doctoral cuenta con el desarrollo de siete sistemas diferentes los cuales generan hasta 8 contribuciones originales al estado del arte: (1) desarrollo de un sistema de monitorización inteligente de contenedores abierto, de bajo consumo y bajo coste con arquitectura IoT, (2) aplicación de ultrasonidos con piezoeléctricos para una cadena de transmisión DBPSK de bajo coste que comunica el interior con el exterior de los contenedores evitando, además, la perforación de sus paredes, (3) implementación novedosa de un modulador DBPSK de bajo consumo a partir de la respuesta del canal como un filtro LP y la utilización biestables flip-flop y puertas NAND, (4) aplicación de técnicas de submuestreo para una implementación OFDM de 127 portadoras D8PSK para el aumento del ancho de banda del canal de ultrasonidos, (5) demostración y validación de la posible aplicación de RFID pasivo al inventario de carreteras y entornos urbanos de forma eficiente, así como para navegación o comunicaciones I2V, (6) aplicación de la reflectometría en el dominio temporal (TDR) a la monitorización y el diagnóstico de las correas de los ascensores permitiendo la inspección de las mismas de forma no invasiva y con sistemas de bajo coste, (7) aplicación de técnicas *Compressive Sensing* sobre la aportación (7) que, en el marco de IoT, que ofrece grandes sistemas de computación, permite disminuir la cantidad de datos necesario, con el consecuente ahorro energético, y aumentar la resolución del sistema hasta 3 órdenes de magnitud y (8) desarrollo de un sistema SHM de bajo consumo, bajo coste y en el marco IoT basado en algoritmos AR-ARX con capacidad de detectar daños estructurales.

This doctoral thesis proposes the application of the *Internet of Things* (IoT) architecture as a set of enabling technologies whose purpose is to provide services to satisfy the demands of ordinary consumers on the one hand, facilitating their day to day lives, and of industry on the other, through process optimization. At present, however, a comprehensive rollout of the IoT such as it is conceived is not practical due to a series of technological constraints which are yet to be overcome. Therefore, for the purpose of this thesis, a series of applications have been selected which are relevant both to transport and infrastructure industries as well as society in a wider context. Subsequently, a set of case studies will be presented which highlight the technological constraints mentioned previously. These constraints are overcome with innovative solutions, which are based on this Thesis' contributions in the field, presented below.

First, an intelligent monitoring system for freight containers is proposed, which is both open and low power. This system provides a solution for constraint of integrating different physical values measured (temperature, relative humidity, GPS etc...) by means of a hardware interface and open software. Moreover, it provides solution for the requirement that this information has to be transmitted through various communication networks (local, mobile or satellite) until reaching the cloud, by using communication interfaces connected to a common server in the cloud. Following its development, this system is validated in the intermodal corridor running between Madrid, Seville and the Canary Islands. This particular transport route requires containers to be transported via truck, train and boat/ship. On the other hand, this system highlights the need to create a communication channel connecting the inside of the container, where those tasked with monitoring the merchandise and its evolution are found, with the outside and the network interface, without perforating the container itself.

For this purpose, an ultrasound communication interface is developed using piezoelectric transceivers and DBPSK modulation. Following initial testing, the system is updated in two ways with the objective of maximizing energy efficiency and bandwidth. The first update replaces the analog DBPSK modulator with a purely digital one, based on flip-flop and NAND logical doors and using the LP response of the communication channel. This leads to a significant reduction of the power consumption (two orders of magnitude). The second one uses subsampling methods in order to substitute DPSK modulation with an 128 D89PSK carriers modulation, exploiting the appearance of a new frequency band with more gain and bandwidth as a consequence of substituting a magnetic method of fixation of the piezoelectric with an epoxy resin which improves impedance matching. Test results validate the proposed solution as they show a minimization of three orders of magnitude in the power consumption and a 20x increase in bandwidth compared to the original implementation.

Another of the case studies posits the automatic inventory of road signs and its use of them for navigation through the use of passive RFID technology. This technology shows several advantages over optical methods used traditionally - which suffer in cases of low visibility and at night - as well as over active RFID (proprietary protocols, more expensive tags, higher maintenance costs due to batteries). Field testing results, as shown during theoretical study (including multipath effect and RFID reader in movement), confirm viability of the use of passive RFID in this application as well as opening the possibility of its use in new applications such as the inventory of urban facilities or I2V communication systems.

Furthermore, this thesis proposes a monitoring system for elevator belts using reflectometry (TDR). While this process implies the transmission and processing of large amounts of data - which bears a heavy cost in energy consumption - the utilization of Compressive Sensing techniques is recommended in order to minimize the amount of samples necessary for analysis to be completed, despite this requiring higher processing power. Nevertheless, this is one of the main advantages offered by IoT, and its application results in an increase in resolution of faults location in the belt systems under inspection from 70m in the original scenario to 9.1cm using Compressive Sensing.

Lastly, a low cost and energy efficient Structural Health Monitoring (SMH) system has been developed which, from vibration-data collected of the structure in question and the use of processing power provided by the IoT,

applies an algorithm based on autorregressive models (AR-ARX) in order to evaluate the health of the structure and detect any potential damage. This model was tested on the models of a bridge and a five-story building respectively.

In conclusion, this Doctoral Thesis employs seven new systems which provide as much as 8 contributions to the established/available literature: (1) development a low-cost, energy efficient, intelligent and open system for monitoring containers, using IoT architecture, (2) use of ultrasound with piezoelectric for a low-cost DBPSK transmission system which allows for communication between the interior and exterior of said containers whilst not requiring their perforation, (3) determination of optimal modulation scheme based on exhaustive study of communication channel and its implementation through low cost devices, (4) application of subsampling technics to implement a low power and 128 D8BPSK carriers OFDM modulation for increased bandwidth in the ultrasound channel, (5) demonstration and validation of the potential application of passive RFID to roadway inventory and urban environments in an efficient manner, as well as its use for navigation and I2V communication, (6) use of reflectometry in the time domain (TDR) for the monitoring and diagnostics of elevator belts, permitting their real time inspection in a non-intrusive and low cost manner, (7) use of Compressive Sensing techniques on part (6) which, used in an IoT architecture - offering large amount of processing power – allows a reduction in the amount of data necessary, resulting in energy savings and increasing the precision of the system up to 3 orders of magnitude and (8) development of a low cost and low power SHM system in an IoT architecture based on AR-ARX algorithms with the ability to detect structural damage in civil infrastructures.

AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE	XVII
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XXIII
NOTACIÓN	XXIX
0. CAPÍTULO 0. INTRODUCCIÓN	33
0.1. MOTIVACIÓN.....	34
0.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	34
0.3. RESUMEN DE LA TESIS.....	37
0.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	41
1. CAPÍTULO 1. IOT COMO PARADIGMA DE INTERCONEXIÓN. VISIÓN GENERAL E HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	45
1.1. INTERNET OF THINGS (IOT) COMO MARCO DE TRABAJO. ESTADO DEL ARTE Y EVOLUCIÓN	46
1.2. ARQUITECTURA DE SISTEMAS IOT	49
1.3. IMPLEMENTACIONES IOT: SMART CITY E INDUSTRIAL IOT	51
1.4. IDENTIFICACIÓN DE RETOS TECNOLÓGICOS EN EL MARCO IOT	53
1.5. HIPÓTESIS DE PARTIDA	54
1.6. REFERENCIAS	56
2. CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CONTENEDORES INTELIGENTES IOT, GLOBAL, ABIERTO, DE BAJO COSTE Y BAJO CONSUMO	61
2.1. INTRODUCCIÓN	63
2.2. TENDENCIA A MEJORAR LAS INFRAESTRUCTURAS Y TICs APLICADAS A ESTE CONTEXTO.....	64
2.2.1. <i>Actualización de Infraestructuras y TICs como elemento de mejora de la eficiencia de los Puertos de Mercancías. Puerto de Sevilla como caso concreto</i>	<i>64</i>
2.3. CONTENEDORES INTELIGENTES COMO ELEMENTOS FUNDAMENTALES EN LA MEJORA DE LA CADENA LOGÍSTICA	65
2.3.1. <i>Importancia de la presencia de las TICs en los sistemas de monitorización de contenedores</i>	<i>66</i>
2.3.2. <i>Container Unitized Tracking System (CUTS).....</i>	<i>67</i>
2.4. IOT EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS. IMPLANTACIÓN Y RETOS.....	68
2.5. PROYECTO CONTAINER UNITIZED TRACKING SYSTEM (CUTS)	71
2.5.1. <i>Estado del Arte de sistemas de monitorización de contenedores de mercancías.....</i>	<i>72</i>
2.5.2. <i>Alcance del sistema CUTS.....</i>	<i>73</i>
2.5.3. <i>Definición del Sistema CUTS</i>	<i>74</i>
2.5.4. <i>Arquitectura HW</i>	<i>82</i>
2.5.5. <i>Arquitectura SW</i>	<i>88</i>
2.5.6. <i>Red local IEEE 802.15.4</i>	<i>92</i>
2.5.7. <i>Demostrador CUTS.....</i>	<i>95</i>
2.6. CONCLUSIONES Y PROBLEMÁTICAS DEL SISTEMA CUTS	103
2.7. REFERENCIAS	105
3. CAPÍTULO 3. DISEÑO, DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN POR ULTRASONIDOS IOT PARA MONITORIZACIÓN DE CONTENEDORES DE MERCANCÍAS.....	111
3.1. INTRODUCCIÓN	113
3.1.1. <i>Soluciones previas no invasivas para contenedores de mercancía</i>	<i>113</i>
3.1.2. <i>Ultrasonidos como tecnología de transmisión.....</i>	<i>114</i>
3.2. DISEÑO DE CONTENEDORES INTELIGENTES PARA LA GESTIÓN DEL TRACKING DE MERCANCÍAS BASADOS EN UNA RED DE SENSORES DE BAJO CONSUMO Y UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN NO INVASIVO.....	116

3.2.1.	<i>Descripción general del sistema</i>	<i>116</i>
3.2.2.	<i>Diseño completo del sistema de ultrasonidos</i>	<i>118</i>
3.2.3.	<i>Resultados experimentales</i>	<i>126</i>
3.2.4.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>131</i>
3.3.	DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN NO INVASIVO PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS EN CONTENEDORES OPTIMIZADO EN CONSUMO	131
3.3.1.	<i>Mejora del soporte y caracterización del canal.....</i>	<i>131</i>
3.3.2.	<i>Diseño y caracterización de distintos esquemas de modulación</i>	<i>134</i>
3.3.3.	<i>Resultados experimentales</i>	<i>141</i>
3.3.4.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>143</i>
3.4.	DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN NO INVASIVO PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS EN CONTENEDORES OPTIMIZADO EN ANCHO DE BANDA	143
3.4.1.	<i>OFDM como alternativa para la mejora del ancho de banda del sistema de transmisión de información por ultrasonidos</i>	<i>143</i>
3.4.2.	<i>Acoplamiento de señal.....</i>	<i>144</i>
3.4.3.	<i>Modulación OFDM implementada.....</i>	<i>145</i>
3.4.4.	<i>Resultados experimentales</i>	<i>148</i>
3.4.5.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>151</i>
3.5.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	152
3.6.	REFERENCIAS	153
4.	CAPÍTULO 4. DISEÑO DE SISTEMAS IOT PARA MONITORIZACIÓN, GESTIÓN Y DIAGNOSIS DE INFRAESTRUCTURAS	159
4.1.	SISTEMA DE INVENTARIO Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES DE TRÁFICO EN CARRETERAS Y ENTORNOS URBANOS BASADO EN RFID PASIVO 161	
4.1.1.	<i>Introducción</i>	<i>161</i>
4.1.2.	<i>Descripción del sistema y aspectos de implementación.....</i>	<i>164</i>
4.1.3.	<i>Cálculo del radioenlace RFID.....</i>	<i>168</i>
4.1.4.	<i>Validación del sistema.....</i>	<i>173</i>
4.1.5.	<i>Comparativa con otros sistemas similares</i>	<i>184</i>
4.1.6.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>187</i>
4.2.	SISTEMA Y MÉTODO DE MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DE CORREAS DE ASCENSORES BASADOS EN REFLECTOMETRÍA Y TÉCNICAS DE COMPRESSIVE SENSING	188
4.2.1.	<i>Introducción y estudio del estado del arte.....</i>	<i>188</i>
4.2.2.	<i>Descripción del sistema y aspectos de implementación.....</i>	<i>190</i>
4.2.3.	<i>Validación Experimental</i>	<i>194</i>
4.2.4.	<i>Compressive sensing para localización de fallos</i>	<i>195</i>
4.2.5.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>198</i>
4.3.	MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL	199
4.3.1.	<i>Introducción y estudio del estado del arte.....</i>	<i>199</i>
4.3.2.	<i>Algoritmos SHM.....</i>	<i>200</i>
4.3.3.	<i>Diseño de nodos inalámbricos y aspectos de implementación</i>	<i>202</i>
4.3.4.	<i>Resultados experimentales</i>	<i>206</i>
4.3.5.	<i>Conclusiones.....</i>	<i>211</i>
4.4.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	212
4.5.	REFERENCIAS	213
5.	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	221
5.1.	CONCLUSIONES	222
5.2.	CONCLUSIONS	223
5.3.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	224
5.4.	FUTURE LINES OF RESEARCH	225
5.5.	PUBLICACIONES DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS	226
5.5.1.	<i>Artículos de Revista Internacionales con JRC.....</i>	<i>226</i>
5.5.2.	<i>Patentes</i>	<i>227</i>
5.5.3.	<i>Artículos de Revista Internacionales con JRC en fase de Revisión.....</i>	<i>227</i>
5.5.4.	<i>Artículos de Congresos Internacionales</i>	<i>227</i>
5.5.5.	<i>Artículos de Revista Internacionales sin JRC</i>	<i>227</i>
5.6.	PUBLICACIONES PARCIALMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS	227

6.	CAPÍTULO 6. APÉNDICE A: PUBLICACIONES.....	231
6.1.	ARTÍCULOS DE REVISTAS INTERNACIONALES CON JRC.....	232
6.2.	PATENTES.....	232
6.3.	ARTÍCULOS EN REVISTAS INTERNACIONALES CON JRC EN FASE DE REVISIÓN	232
6.4.	ARTÍCULOS DE CONGRESOS INTERNACIONALES	232
6.5.	ARTÍCULOS DE REVISTAS INTERNACIONALES SIN JRC	233
6.6.	PUBLICACIONES PARCIALMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS DOCTORAL	233
6.7.	PUBLICACIONES.....	233

Índice de Tablas

Tabla 2 - 1. Especificaciones Radioeléctricas	93
Tabla 2 - 2. Características eléctricas	93
Tabla 2 - 3. Tipos de red y características	94
Tabla 3 - 1. Características de los sensores	123
Tabla 3 - 2. Características del Microcontrolador	124
Tabla 3 - 3. Comparativa con otros trabajos relacionados	126
Tabla 3 - 4. Resultados experimentales del sistema completo	127
Tabla 3 - 5. BER bajo excitación mecánica de baja frecuencia (1 Hz a 1 KHz) sobre el canal metálico	138
Tabla 3 - 6. BER bajo excitación mecánica (pulsos de 5ms) sobre el canal metálico	138
Tabla 3 - 7. BER con perturbación eléctrica a altas frecuencias (100 KHz – 100 MHz)	139
Tabla 3 - 8. Comparativa de distintos sistemas de comunicación por ultrasonidos en canal metálico	143
Tabla 3 - 9. BER obtenida para diferentes modulaciones OFDM	148
Tabla 3 - 10. Energía normalizada consumida (μ J) para distintos escenarios	149
Tabla 3 - 11. EVM obtenida para distintos escenarios	150
Tabla 3 - 12. Comparativa entre sistemas de comunicación por ultrasonidos en canal metálico	151
Tabla 4 - 1. Sistemas RFID en aplicaciones de carreteras	163
Tabla 4 - 2. Codificación de información en el EPC	167
Tabla 4 - 3. Comparativa entre entornos metálico y no metálico	176
Tabla 4 - 4. Alcance de los tags activos	176
Tabla 4 - 5. Resultados en movimiento	183
Tabla 4 - 6. Comparación entre sistemas RFID para detección de señales de tráfico	184
Tabla 4 - 7. Comparativa entre sistemas similares basados en RFID pasivo	186
Tabla 4 - 8. Características principales del amplificador INA321E	192
Tabla 4 - 9. Comparativa entre distintos sistemas de localización de fallos	198
Tabla 4 - 10. Consumo y ahorro de potencia	201
Tabla 4 - 11. Características de Zigbee-IEEE 802.15.4-2006	203
Tabla 4 - 12. Características del nodo inalámbrico	205
Tabla 4 - 13. Frecuencias Naturales - Reales y Sintéticas	208

Índice de Figuras

Figura 0 - 1. Crecimiento de los sistemas de computación a lo largo del tiempo	37
Figura 1 - 1.. Descripción general de IoT.....	46
Figura 1 - 2.. Nacimiento de la IoT. Dispositivos vs Personas conectados.....	47
Figura 1 - 3. Evolución de artículos (naranja) y congresos (azul) sobre IoT en IEEE.....	47
Figura 1 - 4. Número de dispositivos Internet of Things (IoT) conectados.....	48
Figura 1 - 5. Mercado global IoT (Billones de US\$)	48
Figura 1 - 6. Arquitectura IoT de 3, 4, y 5 capas.....	50
Figura 1 - 7. Arquitectura IoT	52
Figura 1 - 8. Mercado IoT por sector	53
Figura 2 - 1. esquema de cadena de transporte intermodal.....	63
Figura 2 - 2. Gestión de Flotas sobre IoT. 2014 - 2025.....	68
Figura 2 - 3. Arquitectura CUTS	71
Figura 2 - 4. Container Security Device (CSD).....	72
Figura 2 - 5. Plataforma Avanzada de Integración de Servicios	74
Figura 2 - 6. Diagrama Funcional PAD	81
Figura 2 - 7. Bloques funcionales TU (PAD + TCI)	81
Figura 2 - 8. Arquitectura HW	83
Figura 2 - 9. Arquitectura HW de los TUs	84
Figura 2 - 10. Arquitectura LB	84
Figura 2 - 11. Arquitectura SB.....	85
Figura 2 - 12. Diseño SB1. Izda. 2D, Dcha. 3D.....	86
Figura 2 - 13. Diseño SB2 - Izda. 2D - Dcha. 3D.....	87
Figura 2 - 14. Nodo Completo	87
Figura 2 - 15. Detalle nodo.....	88
Figura 2 - 16. Torres de protocolos del sistema.....	88
Figura 2 - 17. Diagrama flujo SB en estado ON permanente.....	89
Figura 2 - 18. Proceso de envío de datos LB-TCI.....	89
Figura 2 - 19. Comprobación de estado de alarmas.....	90
Figura 2 - 20. Diagrama Flujo SW sensor cada 15 min.....	90
Figura 2 - 21. Diagrama flujo SW petición Lectura FI-WARE.....	91
Figura 2 - 22. Envío de información TCI-LB.....	91
Figura 2 - 23. Diagrama flujo SW petición actuación desde FIWARE	92
Figura 2 - 24. Diagrama flujo alarmas generadas por sensores	92

Figura 2 - 25. Despliegue de la LP-WPAN en Buques y Tren	96
Figura 2 - 26. Despliegue LP-WPAN en Camión y Terminal Portuaria	96
Figura 2 - 27. Concentrador en Tren.....	97
Figura 2 - 28. Transporte de TUs por carretera	98
Figura 2 - 29. Instalación de TUs en Tren	98
Figura 2 - 30. Llegada Tren a APS (Izda.), Instalación en Buque OPDR Canarias (Dcha.)	99
Figura 2 - 31. Despliegue de TUs en buque OPDR Andalucía.....	100
Figura 2 - 32. Monitorización Trayecto Madrid - Canarias	101
Figura 2 - 33. Monitorización Trayecto Madrid - Canarias - Madrid	101
Figura 2 - 34. Trayecto Tenerife - Las Palmas – Lanzarote	102
Figura 2 - 35. Trayecto en Sevilla (Tren y Barco)	102
Figura 2 - 36. Monitorización Temperatura y Humedad	103
Figura 2 - 37. Monitorización Luminosidad y Detección de Movimiento.....	103
Figura 3 - 1. Esquema de transmisión de datos por ultrasonidos.....	114
Figura 3 - 2. Ejemplo de utilización de Piezoeléctricos	115
Figura 3 - 3. Detalle de implementación.....	118
Figura 3 - 4. Caracterización de un transductor en laboratorio.....	119
Figura 3 - 5. Caracterización experimental	120
Figura 3 - 6. Filtro de reconstrucción.....	121
Figura 3 - 7. Modulación DBPSK	121
Figura 3 - 8. Trama de información	125
Figura 3 - 9. Campos de Medida	125
Figura 3 - 10. Campos de Alarmas.....	125
Figura 3 - 11. Instalación en el interior (Izda.) y exterior (Dcha.) del contenedor.	127
Figura 3 - 12. Vista general de la interfaz web del sistema GETM	128
Figura 3 - 13. Vista de la gestión del Contenedor 1	128
Figura 3 - 14. Detalle de los valores tomados para el Contenedor 1	129
Figura 3 - 15. Información de identificación del Contenedor 1	129
Figura 3 - 16. Histórico de medidas del Contenedor 1	130
Figura 3 - 17. Tracking y servicio de Geofencing del Contenedor 1	130
Figura 3 - 18. Esquema del soporte magnético para el transductor piezoeléctrico.....	132
Figura 3 - 19. Soporte magnético fabricado	132
Figura 3 - 20. Set-up utilizado para la caracterización del canal	133
Figura 3 - 21. Respuesta en frecuencia normalizada: (a) Transductores fijados con los soportes magnéticos, (b) Detalle del rango de frecuencias de interés de (a), (c) Transductores colocados directamente uno frente al otro, y (d) Detalle del rango de frecuencias de interés de (c)	133
Figura 3 - 22. Formas de onda de las modulaciones estudiadas.....	134

Figura 3 - 23. Esquema de demodulación OOK con umbral estático.....	135
Figura 3 - 24. Esquema de demodulación de OOK con codificación Manchester.....	135
Figura 3 - 25. Esquema de demodulación PPM.....	136
Figura 3 - 26. Esquema de demodulación de DBPSK	136
Figura 3 - 27. Vibrador mecánico Pasco SF-9324.....	137
Figura 3 - 28. Diagrama de bloques del sistema implementado.....	140
Figura 3 - 29. Esquema de realimentación del amplificador de carga pseudo-diferencial.....	141
Figura 3 - 30. Resultado del algoritmo de detección de frecuencias optimas.....	141
Figura 3 - 31. Ajuste de la sensibilidad del amplificador de carga en función de la tensión de entrada.....	141
Figura 3 - 32. Señal transmitida y recibida a la salida del amplificador de carga.....	142
Figura 3 - 33. Tensión y corriente por periodo de la portadora	142
Figura 3 - 34. Respuesta en frecuencia usando resina epoxi e imanes	144
Figura 3 - 35. Esquemas de transmisión y recepción OFDM	146
Figura 3 - 36. Constelación recibida (Izda.) y respuesta del canal (Dcha.)para una modulación D8PSK	150
Figura 4 - 1. Visión general del sistema	165
Figura 4 - 2. Localización de las señales de tráfico georreferenciadas.....	166
Figura 4 - 3. Mapa con la capa de señales de tráfico habilitada	166
Figura 4 - 4. Reflexión multitrayecto.....	170
Figura 4 - 5. Antena RFID	173
Figura 4 - 6. Set-up experimental	174
Figura 4 - 7. Lectura de múltiples tags pasivos.....	175
Figura 4 - 8. Medida de alcance con antena y tag no alineados.....	175
Figura 4 - 9. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz.....	178
Figura 4 - 10. Simulaciones con $v=120$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz	179
Figura 4 - 11. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=4$ m, $f=866.5$ MHz.....	180
Figura 4 - 12. Simulaciones con $v=120$ Km/h, $d=4$ m, $f=866.5$ MHz	180
Figura 4 - 13. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz. $\sigma = rrms$	181
Figura 4 - 14. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=2.45$ GHz	181
Figura 4 - 15. Tags sobre la señal de tráfico (izda.). Set-up de las pruebas (dcha.).....	182
Figura 4 - 16. Número de detecciones en cada caso	183
Figura 4 - 17. Descripción del sistema.....	190
Figura 4 - 18. Esquemático de la etapa de control digital de impedancias.....	191
Figura 4 - 19. Interfaz de entrada al ADC	192
Figura 4 - 20. PCB del reflectómetro diseñada.....	193
Figura 4 - 21. PCB del reflectómetro fabricada	193
Figura 4 - 22. Pulso generado (1) y reflejado (2) debido a un fallo a 4m.....	195
Figura 4 - 23. Captura de la señal con el osciloscopio (1) y señal recuperada (2).....	196

Figura 4 - 24. Número de muestras M necesarias para diferentes requisitos de resolución espacial Δ	197
Figura 4 - 25. Diagrama de bloques del Nodo SHM.....	203
Figura 4 - 26. Nodo inalámbrico remoto	205
Figura 4 - 27. Placa de acero rectangular (puente)	206
Figura 4 - 28. Estructura de 5 plantas rectangulares.....	206
Figura 4 - 29. Señal sintética	207
Figura 4 - 30. Configuración para adquisición de modelo de comportamiento saludable (9.52 Kg)	208
Figura 4 - 31. Registro de serie temporal. Estructura saludable.....	208
Figura 4 - 32. Test real (22.61 Kg)	209
Figura 4 - 33. Índice de Daños de test reales.....	209
Figura 4 - 34. Configuración de nodos sensores en una estructura de 5 pisos de planta rectangular.....	210
Figura 4 - 35. Resultados de test con daños estructurales	211

Notación

IoT	Internet of Things
HW	Hardware
SW	Software
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
DBPSK	Diferencial Binary Phase Shift Keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
RFID	Radio Frequency Identification
EPC	Electronic Product Code
CS	Compressive Sensing
ARM	Advanced RISC Machine
ADC	Analog-to-Digital Converter
SHM	Structural Health Monitoring
AR-ARX	ArutoRegressive and Autoregressive model with Exogenous inputs algorithm
I2V	Infrastructure-to-Vehicle communication
TDR	Time-Domain reflectometry
WSN	Wireless Sensor Network
MIT	Massachusetts Institute of Technology
UPC	Universal Product Code
IPSO	Internet Protocol in Networks of Smart Objects
M2M	Machine-to-Machine Communication
TICS	Tecnologías de la Información y la Comunicación
SOA	Service-Oriented Architecture
PLC	Programmable Logic Controller
NFC	Near-Field Communication
WAN	Wide Area Network
LAN	Local Area Network
NB-IoT	NarrowBand Internet of Things
PAN	Personal Area Network
QR	Quick Response code
IIoT	Industrial Internet of Things
EIoT	Enterprise Internet of Things
SIoT	Social Internet of Things
IETF	Internet Engineering Task Force
REST	Representational State Transfer
6LoWPAN	IPv6 over Low Power Area Network
PIB	Producto Interior Bruto
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit

TEN-T	Trans-European Transport Network
APS	Autoridad Portuaria de Sevilla
FIUS	Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla
ERDF	European Region Development Funds
CUTS	Container Unitized Tracking System
FPS	Ferro Port System
eRIO	e-River Information and Optimization
RIS	River Information Services
AIS	Automation Identificación System
PCS	Port Community Systems
GSM	Global System for Mobile communications
CSD	Container Security Device
OCR	Optical Character Recognition
PAD	Plataforma de Adquisición de Datos
TCI	Terminal de Comunicaciones Inalámbrico
PAIS	Plataforma Avanzada de Integración de Servicios
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
SIM	Subscriber Identity Module
RTC	Real Time Clock
DAC	Digital-to-Analog Converter
TU	Terminal de Usuario
SPI	Serial Peripheral Interface
IIC	Inter-Integrated Circuit communication
JTAG	Joint Test Action Group
PIR	Passive Infrared Sensor
GPIO	General-Purpose Input/Output
IPxx	International Protection marking
IP	Internet Protocol
GW	GateWay
RF	RadioFrequency
OTA	Over The Air
GPRS	General Packet Radio Service
LB	Logical Board
SB	Sensor Board
CPU	Central Processor Unit
DC	Direct Current
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
API	Application Programming Interface
LP-UART	Low Power UART
SMBus	System Management Bus
ARP	Address Resolution Protocol
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
ISM	Industrial, Scientific and Medial radio band

LQI	Link Quality
MAC	Media Access Control
LUT	Look-up-Table
CRC	Cyclic Redundancy Check
EMAT	Electromagnetic Acoustic Transducers
ISI	Intersymbol Interference
BER	Bit Error Rate
IC	Integrated Circuit
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter ó Transmisor-Receptor Síncrono/Asíncrono Universal
AM	Amplitude Modulation
NRZ	Non-Return-to-Zero
OOK	On-Off Keying
PPM	Pulse-Position Modulation
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	<i>Inverse</i> Fast Fourier Transform
ISO	International Organization for Standardization
ADAS	Asistencia conductor avanzada
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASK	Amplitude-Shift keying
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
MFL	Magnetic Flux Leakage
FDR	Frequency-Domain Reflectometry
TFDR	Time/Frequency-Domain Reflectometry
NDR	Noise-Domain Reflectometry
AWG	Arbitrary Waveform Generator
CS	Compressive Sensing
CSB	Coated Steel Belt
PCB	Printed-Circuit Board
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
SHM	Structural Health Monitoring
WGBEMS	Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System
OMA	Operational Modal Analysis
NCSE	Norma de Construcción Sismorresistente
BW	BandWidth

CAPÍTULO 0. INTRODUCCIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

MOTIVACIÓN	34
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	34
RESUMEN DE LA TESIS	37
ESTRUCTURA DE LA TESIS	41

Este capítulo está destinado a introducir al lector en el marco de desarrollo de esta Tesis Doctoral detallando inicialmente la motivación que lleva al autor a desarrollar el trabajo detallado a lo largo de los siguientes capítulos. Posteriormente, continúa con un detalle de los principales puntos de la metodología de desarrollo seguida y finaliza con un resumen del contenido y la estructura de esta Tesis Doctoral.

0.1. Motivación

La motivación de la Tesis Doctoral está fundamentada en las necesidades y retos tecnológicos planteados por la asunción del paradigma del Internet of Things (IoT) como marco de comunicación y procesado para los nuevos dispositivos electrónicos, así como el punto de alojamiento de los servicios ofrecidos a los usuarios tras la explotación de dichos datos.

Una de las características que define la sociedad actual es la hyper-conectividad a los sistemas de información, de los que cada vez se espera que ofrezcan servicios más avanzados que nos faciliten la vida diaria. Esto es debido a la enorme evolución tecnológica sufrida durante los últimos años, la cual, se ha visto sustentada principalmente por la explosión de las redes sociales, el uso de los smartphones, la evolución de las técnicas de análisis de datos y la *nube*. El concepto de *nube* se entiende como el sistema global y virtual, compuesto por una serie de recursos de almacenamiento, procesamiento e interconexión que ofrece sus servicios a los usuarios. En la misma línea, los servicios ofrecidos a los usuarios se sustentan en la monitorización de un catálogo de magnitudes físicas totalmente heterogéneo, lo que pone de manifiesto la necesidad de utilizar una arquitectura de sistema independiente de la magnitud medida.

Por tanto, se necesita disponer de una arquitectura suficientemente genérica que permita integrar todos los tipos, tanto de redes de comunicación como de magnitudes a monitorizar posibles. Esto supone, no solo integrar las tecnologías existentes, sino garantizar la integrabilidad de las que pudieran aparecer, debido a la evolución y naturaleza cambiante del ecosistema electrónico.

IoT se presenta como la solución a las cuestiones que aparecen en los párrafos anteriores, sin embargo, el despliegue definitivo requiere superar una serie de retos tecnológicos identificados en esta Tesis, los cuales se listan a continuación:

- Reducción del consumo energético, de forma minimice tanto el coste de operación como de mantenimiento derivado del cambio de las baterías.
- Reducción del coste de los dispositivos, para permitir un despliegue masivo de nodos.
- Integración de datos heterogéneos bajo una misma arquitectura, para permitir la explotación de las sinergias que pudieran aparecer entre estos.
- Interoperabilidad de redes de comunicación de distinta naturaleza bajo una misma arquitectura de forma que se posibilite el despliegue y se garantice la cobertura en todo tipo de entornos.
- Procesado masivo y eficiente de datos que permita la explotación de los datos en tiempo real.
- Seguridad de la información y los servicios ofrecidos, que garantice la integridad y privacidad de la información.
- Retos de índole legal y ética.

El planteamiento de soluciones para la superación de los retos tecnológicos comentados ha dado lugar a una serie de líneas de investigación, lo que ha posibilitado el desarrollo de soluciones innovadoras que permiten avanzar en el estado del arte. Dichas soluciones son validadas tanto desde un marco teórico como práctico, para lo que se sigue la metodología de trabajo detallada en el siguiente punto.

0.2. Metodología de trabajo

El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral está basado, como se ha comentado en el punto anterior, en la necesidad de afrontar una serie de retos de los sistemas existentes o desarrollar los nuevos diseños. Estos diseños se llevarán a cabo según las líneas que marca el paradigma IoT de forma que éstos puedan integrarse dentro de dicha arquitectura, y puedan beneficiarse de las bondades que IoT ofrece, así como garantizar la explotación e integración de dichos dispositivos con los que están por venir a futuro.

Los sistemas diseñados a lo largo de esta Tesis se pueden ubicar en el marco del transporte y la infraestructura civil. La selección de estos dos campos de aplicación no es casual, sino que, está fundamentada en el alto nivel de impacto de ambas tanto en la economía como en la sociedad. Además, dentro de cada uno de estos marcos de trabajo, se han seleccionado casos de uso que ponen de manifiesto los retos tecnológicos que presenta el despliegue real de IoT, lo que actúa como hipótesis de partida para el desarrollo de dichas soluciones.

La metodología de trabajo a lo largo de esta Tesis Doctoral está fundamentada en la división de cada uno de los desarrollos realizados en distintas fases de diseño con un alcance determinado, tales como las que se presentan a continuación.

Estudio del estado del arte e identificación de retos de la IoT

Tanto a la hora de contextualizar el marco de trabajo de esta Tesis Doctoral, como a la de afrontar el desarrollo de cada uno de los sistemas implementados, se ha adoptado, como primera tarea, la realización del estudio del estado del arte con el objetivo de analizar el conocimiento existente en la técnica en concreto y los desarrollos realizados en ese ámbito hasta la fecha. Además, esta tarea es fundamental para detectar los vacíos existentes en el estado de la técnica, las necesidades a cubrir a la hora de acometer un nuevo desarrollo así como los retos tecnológicos que presenta cada desarrollo.

Por tanto el estudio del estado del arte se sitúa como uno de los principales puntos de absorción de conocimiento y por tanto como punto de partida para los desarrollos acometidos.

Además, durante las fases iniciales de esta Tesis se ha mantenido contacto directo con expertos internacionales en la materia, a través de estancias internacionales, que han aportado un valor añadido a la calidad de la misma.

Identificación de aplicaciones industriales en el campo del transporte de mercancías e infraestructuras

Una vez identificados los retos tecnológicos a superar en los desarrollos, la metodología de trabajo seguida se centra en el análisis y detección de aplicaciones industriales de relevancia suficiente y, más concretamente, en la detección y el planteamiento de casos de uso dentro de esas aplicaciones que pongan de manifiesto los retos planteados por la tecnología.

De esta forma, el éxito de los desarrollos a realizar validará la superación de los retos tecnológicos identificados y, por tanto, posibilitará el avance del estado del arte. La elección de aplicaciones industriales está justificada desde el punto de vista que sitúa a este marco, el industrial, como el más realista a la hora de considerar un despliegue real de IoT.

Para el caso que nos ocupa, dentro del marco del transporte de mercancías, el caso de uso seleccionado es el transporte de mercancías en contenedores. Por otro lado en lo que a infraestructuras se refiere se selecciona como casos de uso la realización del inventario de señales de carretera, la monitorización de las correas de los ascensores y la monitorización de la salud estructural de la infraestructura civil.

Definición de arquitectura de referencia adaptada a la aplicación concreta

Tras la definición de los campos de aplicación y los casos de uso a cubrir, el siguiente paso dentro de la metodología de trabajo es la definición de la arquitectura de referencia adoptada en cada uno de los desarrollos a realizar. Es esta definición la que propicia un diagrama de bloques funcionales que debe satisfacer los retos planteados por la tecnología. En buena parte, la validación del cumplimiento de

los requisitos del sistema se realizará contra las prestaciones definidas a nivel funcional, lo que garantizará que la implementación posterior se realiza correctamente.

Dado que nos encontramos en un marco IoT, es importante destacar que, en base al estudio del estado del arte de dicho paradigma, la arquitectura seleccionada para los desarrollos ha de cubrir los retos tecnológicos detectados. Además, ha de ser compatible con la arquitectura del resto de sistemas IoT con el objetivo de que tanto los sistemas existentes, como lo que están por desarrollar puedan integrarse.

Además, siempre que ha sido posible, se ha llevado a cabo un análisis teórico basado en modelos de comportamiento, que ha validado la solución adoptada y ha servido de herramienta fundamental en la fase de desarrollo HW y SW.

Desarrollo de la solución HW y SW

En base a la definición de la arquitectura de referencia para cada uno de los desarrollos a realizar, se realiza el diseño y la implementación del sistema, tanto a nivel Hardware como a nivel Software.

En este punto es importante destacar que, debido a la necesidad de realizar un desarrollo muy optimizado (tamaño, consumo, catálogo de magnitudes a sensar, red de comunicación de bajo consumo, etc.), es necesario que el desarrollo software tenga en cuenta la implementación hardware y viceversa.

Por otro lado, también es necesario que, tanto el diseño software como hardware, tengan en cuenta características adicionales como las condiciones de trabajo (interior, exterior, condiciones de humedad, salinidad, temperatura, etc.), la autonomía (baterías, red eléctrica, sin fuente de alimentación, etc.) debido a que esto tendrá impacto en partes del desarrollo como la selección de las envolventes, las interfaces de conexión, los medios de fijación del sistema al punto de medida o el factor de forma del mismo, entre otros.

Para el desarrollo HW se ha utilizado de forma generalizada Altium Designer, mientras que para el desarrollo SW se ha utilizado fundamentalmente IAR Embedded Workbench (EWARM) y LPCXpresso. Además, se han utilizado herramientas de gestión y apoyo al desarrollo como GitLab, JIRA, Redmine o Confluence.

Validación experimental

Finalmente, tras el desarrollo hardware y software de las distintas soluciones, el siguiente paso en la metodología de trabajo ha sido la validación de éstas.

De forma general, la validación de los sistemas desarrollados ha consistido en la prueba de estos en dos entornos claramente diferenciados. Por un lado se realiza la validación de los sistemas en laboratorio, mediante el uso de instrumentación de medida y en base a modelos de comportamiento que emulan la instalación de los dispositivos en un entorno tan cercano a las condiciones reales de trabajo como es posible.

Por otro lado, tras las pruebas de laboratorio, se han realizado las pruebas reales de campo instalando los dispositivos desarrollados en campo y sometidos a condiciones de trabajo totalmente reales (camión, tren y barco para el sistema de monitorización de contenedores, una carretera para el caso del sistema de inventario y un ascensor real para el sistema de monitorización de las correas), lo cual ha servido para validar todo el proceso de desarrollo así como la metodología de trabajo seguida.

Finalmente cabe destacar que, además, durante todo el proceso de desarrollo seguido se ha puesto especial énfasis en la detección de los retos de la tecnología como punto de partida para la generación

de soluciones innovadoras, que contribuyen al avance del estado del arte y que ha posibilitado la generación de numerosas publicaciones internacionales así como una patente nacional.

0.3. Resumen de la Tesis

El avance continuo de la tecnología de sensores, unido a las nuevas redes de comunicación y las técnicas actuales de procesamiento masivo de información, dan lugar a la generación de aplicaciones que ofrecen sus servicios a los usuarios que cada vez demandan más capacidades. La integración de todos estos elementos da lugar a lo que se conoce como el paradigma Internet of Things (IoT) y que ha resultado ser la nueva revolución en lo que a sistemas de computación se refiere, tal y como se puede ver en la siguiente figura, en la que ese muestra la evolución de usuarios/dispositivos para los distintos hitos de la tecnología de computación.

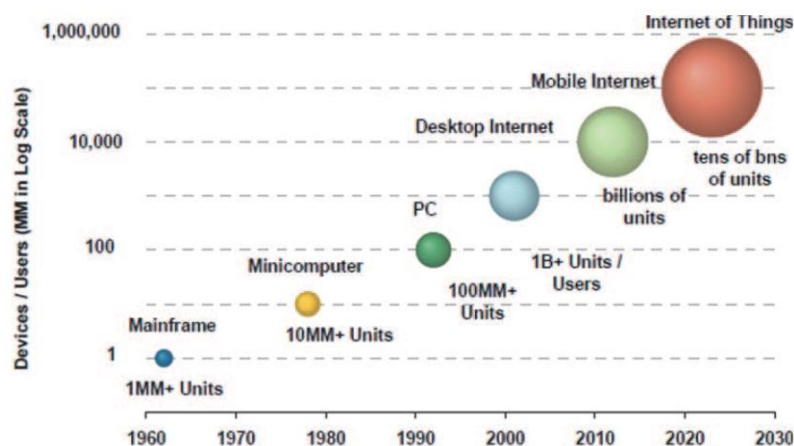


Figura 0 - 1. Crecimiento de los sistemas de computación a lo largo del tiempo¹

No obstante, hoy en día, existen diferentes retos tecnológicos que imposibilitan el despliegue masivo del paradigma IoT como el alto consumo de potencia de los dispositivos, el coste de los mismos, la necesidad de integrar medidas de una naturaleza muy dispar, la integración de múltiples redes heterogéneas, la necesidad de procesar eficientemente cantidades de datos muy elevadas o la seguridad, así como retos desde el punto de vista legal y ético.

En esta Tesis Doctoral, partiendo de los retos tecnológicos detectados, se han seleccionado una serie de campos de aplicación (transporte e infraestructuras) de relevancia y alto impacto sobre la sociedad actual y, más concretamente, varios casos de uso que ponen de manifiesto los retos presentados por la tecnología. De esta forma se han desarrollado soluciones innovadoras que generan aportaciones originales al estado del arte y acercan la técnica actual a las necesidades de un futuro despliegue de la IoT:

1. **Sistema IoT sobre contenedores de mercancías:** El primero de los casos de uso trata sobre el desarrollo de un sistema de monitorización y actuación sobre contenedores de mercancía de bajo coste con capacidad para sensar 6 magnitudes físicas (temperatura, humedad relativa, luminosidad, estado de las puertas, detección de personas y posición GPS) y la actuar remotamente a través de switches. Además, se dota al dispositivo de una interfaz abierta, tanto a nivel HW como SW, que permite integrar cualquier dispositivo sensor o actuador de

[1 - 1] ¹ Choi, A. J. (2014). Internet of Things: Evolution towards a hyper-connected society. 2014 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC), <https://doi.org/10.1109/asscc.2014.7008846>

mercado con la adaptación adecuada. Esto permite abordar el reto de la heterogeneidad de las magnitudes a adquirir y la cantidad de datos a procesar en tiempo real. Finalmente, el desarrollo será validado experimentalmente viajando por toda la cadena intermodal (camión, tren y barco) en el corredor Madrid – Sevilla – Canarias, lo que pone de manifiesto la necesidad de integrar distintas redes en la misma arquitectura (redes locales, red móvil y red satélite) y la necesidad de minimizar el consumo de potencia, para así maximizar tiempo de vida de los nodos y, como consecuencia, minimizar los costes de operación y mantenimiento. La adaptación del diseño a la arquitectura IoT permite el desarrollo de servicios de valor añadido por parte de terceros de los que puede beneficiarse cada eslabón de la cadena logística.

2. **Instalación de nodos IoT en contenedores de forma no intrusiva utilizando ultrasonidos:**

El caso de uso anterior pone de manifiesto la necesidad de evitar utilizar comunicaciones cableadas entre el interior y el exterior de los contenedores para garantizar la estanqueidad de los mismos, así como minimizar el tiempo de instalación y por tanto los costes de mantenimiento. Tras el repaso del estado del arte se opta por utilizar la tecnología ultrasonidos basada en transceptores piezoeléctricos, en la banda de los 40 KHz, cuya validación en laboratorio y experimental arrojan resultados positivos. Sin embargo, añadir una nueva interfaz de comunicación que implica la eliminación del cable de comunicación entre el interior y el exterior de los contenedores supone aumentar el consumo de potencia global del sistema, por lo que será fundamental aportar soluciones de ultra bajo consumo que no minimicen significativamente la autonomía de los nodos y se pueda afrontar con suficiente solvencia dicho reto. Además, la superación de este reto tecnológico supone la aparición de una oportunidad de mercado, por lo que surgen nuevas líneas de investigación, en lo que a la minimización del consumo se refiere, con el objetivo de contar con dispositivos más competitivos.

- Por un lado, se abre una línea de investigación cuyo objetivo principal es la **minimización del consumo de potencia del sistema**. Para ello se diseña un nuevo soporte (carcasa magnética) para los transductores que garantiza una mejor fijación y mayor contacto de estos con el canal metálico, lo cual se valida con una caracterización de la respuesta del sistema completo. Por otro lado se investigará qué esquema de modulación, de entre las que se estimen más adecuadas para la aplicación, ofrece mejores resultados, resultando la DBPSK la más eficiente y robusta ante parásitos eléctricos y mecánico. Los resultados serán validados en laboratorio, resultando en una minimización del consumo de potencia de hasta 2 órdenes de magnitud de la etapa transmisora/receptora de ultrasonidos respecto del diseño original.
- Por otro lado, se investiga el **aumento de la tasa de datos del sistema** realizando una caracterización exhaustiva del canal de comunicación cuando los piezoeléctricos son fijados con resina epoxi en lugar de la carcasa magnética. Dicho estudio arrojará como resultado principal la aparición de una nueva banda, ubicada en los 360 KHz, que presenta una ganancia 20 dB superior a la banda base, además de mayor ancho de banda. Asimismo, se optará por la utilización de esquemas de modulación OFDM como vía para aumentar el ancho de banda del sistema. La combinación de estos dos factores (la modulación OFDM y la banda de 360 KHz) da lugar a un aumento significativo del ancho de banda (2.5 Kbps en el desarrollo anterior, 50 Kbps en este) y la minimización del consumo de potencia (0.38 mW en el desarrollo anterior, 66.7 μ W en este), logrando por tanto los objetivos marcados en cada paso de desarrollo del sistema y resultado en un sistema optimizado para la superación de los restos presentados por el paradigma IoT.

3. **Sistema IoT para inventario de señales de tráfico en carreteras:** En lo que a infraestructura se refiere, se investigará la aplicación de un sistema de inventario de señales de carreteras

basado en RFID pasivo, por las ventajas que ello presenta (garantiza un correcto funcionamiento en condiciones de baja visibilidad y nocturnidad) y frente a RFID activo, ya que se trata de una tecnología basada en estándar abierto, las etiquetas son de bajo coste y no necesita baterías, lo que facilita significativamente su despliegue masivo. En la Tesis Doctoral se ha aportado un estudio teórico que demuestra la viabilidad de la utilización de esta tecnología, incluyendo la reflexión multitrayecto y el efecto de tener un lector RFID en movimiento. Además se ha validado experimentalmente su utilización con las etiquetas seleccionadas (*tags* para entornos metálicos) sin afectar flujo del tráfico habitual y enviando la información a la *nube*, donde puede ser procesada en tiempo real. Adicionalmente se comprueba su posible utilización en entornos urbanos para inventario del mobiliario y las instalaciones o incluso para navegación por carretera, gracias a la heterogeneidad de la información que se puede codificar en su EPC y a los servicios ofrecidos por la capa superior de IoT.

4. **Monitorización de salud de correas de ascensores:** En lo que la monitorización de las correas de los ascensores se refiere, se propone investigar la utilización de la reflectometría² para la monitorización de las correas de los ascensores. Para ello, partiendo del estado del arte, se realizará el diseño HW y SW del sistema, tras lo que se lleva a cabo la validación experimental del sistema. La integración de este desarrollo en el marco IoT posibilita la utilización de los sistemas de alta capacidad de computación de la nube, los cuales, aplicando técnicas *Compressive Sensing* (CS), que permiten la reducción de la cantidad de muestras adquiridas y transmitidas por los nodos situados en cada ascensor, aumentando la precisión del sistema hasta en 3 órdenes de magnitud. Todo ello, manteniendo los dispositivos de adquisición de bajo coste (ADC integrado en microprocesadores ARM) y por tanto minimizando el precio del sistema.
5. **Sistema de Monitorización de Salud Estructural:** Finalmente, extrapolando el concepto *Smart City* de IoT a infraestructuras civiles monitorizadas por redes de alta densidad de nodos inalámbricos, se lleva a cabo el desarrollo de un sistema de Monitorización del Salud Estructural (SHM³) de bajo consumo para el control y la determinación de la salud de dichas infraestructuras en tiempo real. La implementación de estos dispositivos dentro de la arquitectura IoT permite la utilización de los sistemas de cálculo de la nube y por tanto poder hacer frente a la gran carga computacional necesaria en algoritmos SHM como el basado en coeficientes autorregresivos y entradas exógenas (AR-ARX), lo cual habilita la detección de comportamientos anómalos de las estructuras monitorizadas así como daños estructurales. El sistema es validado experimentalmente en el modelo de un puente y un edificio de cinco plantas. La incorporación de este sistema a la arquitectura IoT permite, por otro lado, el desarrollo de servicios de valor añadido que permitan conocer el estado de salud de las estructuras en tiempo real y realizar tareas de mantenimiento predictivo, detección de fallos, localización de estos o incluso estimar el tiempo de vida útil de la infraestructura antes de quedar inutilizada.

Para la completa implementación de los casos de uso anteriores ha sido necesario el desarrollo de nuevas técnicas de diseño electrónico que constituyen las principales **aportaciones originales de la Tesis Doctoral**:

² Técnica utilizada para determinar las características de líneas eléctricas a través de las señales reflejadas. En este caso, se utiliza la discontinuidad de impedancias para detectar anomalías en el trayecto de la señal.

³ Del inglés Structural Health Monitoring.

1. Desarrollo de **un sistema de monitorización y control inteligente de contenedores de mercancías global, abierto, de bajo consumo y bajo coste** optimizado para integración en el paradigma IoT. El sistema ofrece una interfaz abierta a nivel HW y SW para la integración de nuevos sensores y/o actuadores, cuyos datos son transportados por redes de comunicación tanto locales, como móviles o satélite y posteriormente procesados en la nube. A nivel de aplicación se ofrece otra interfaz abierta a terceros para que puedan desarrollar servicios de valor añadido basados en la explotación de la información disponible (planificación, geofencing, gestión de la calidad del transporte, protocolos de seguridad, custodia de la cadena de frío, etc.) y ofrecérselos a los distintos implicados en la cadena logística (propietario de la mercancía, cargadores, remolcadores, navieras, etc.)
2. **Aplicación de la tecnología ultrasonidos** a través de transductores piezoeléctricos como medio de comunicación entre los sensores ubicados en el interior de los contenedores de mercancías y el transmisor inalámbrico instalado en el exterior de los mismos garantizando tanto su integridad y como su estanqueidad frente a los sistemas invasivos utilizados tradicionalmente. Además, la aplicación de esta tecnología aporta como beneficio adicional la minimización de los tiempos y costes de instalación, en tanto que es más rápido instalar los piezoeléctricos transmisor y receptor (con resina epoxi o con soporte magnético) que taladrar el contenedor para pasar un cable o hacerlo aprovechando las juntas flexibles que habitualmente existen en los laterales de las puertas. Adicionalmente, la utilización de un canal de ultrasonidos supone la no existencia de estrés mecánico en la cadena de transmisión, mientras que la comunicación cableada (por taladro o aprovechando las juntas flexibles) sí que está sometida a estrés generado por la apertura y cierre de las puertas, aumentando así la durabilidad de la instalación.
3. Determinación del esquema de modulación apropiado basado en el estudio exhaustivo del canal y de los dispositivos de bajo coste a utilizar. Tras determinar como modulación óptima, de entre las estudiadas, la DBPSK, se realiza una implementación novedosa de un transmisor de muy bajo coste basado únicamente en biestables Flip-Flop y puertas NAND, lo que, además, permite reducir el consumo de la cadena de comunicación en general. La aplicación de esta técnica para la transmisión de información entre el interior y el exterior de los contenedores de mercancías está basada en la respuesta del canal, el cual se comporta como un filtro paso baja y que, por tanto, posibilita generar la señal DBPSK en base a una señal pulsada. Los resultados arrojan una minimización del consumo de energía de hasta 2 órdenes de magnitud respecto de la implementación analógica.
4. Novedoso esquema de comunicación por ultrasonidos de bajo coste orientado a la minimización del consumo energético y maximización del ancho de banda. Esta optimización se lleva a cabo mediante la implementación de un esquema de modulación OFDM (128 portadoras D8PSK), aprovechando, por un lado la utilización de técnicas de submuestreo – permite la simplificación del receptor y disminuye los costes – y, por otro lado, la nueva banda de frecuencias que aparece en la caracterización del canal (Transductor Tx – Pared contenedor – Transductor Rx) en los 360 KHz (9º armónico de la frecuencia natural de los piezoeléctricos seleccionados) con mayor ganancia y ancho de banda respecto de la implementación original. Los resultados validan esta idea en tanto que se obtiene experimentalmente un ahorro en consumo de 3 órdenes de magnitud y un aumento en el ancho de banda de 20 veces superior.
5. **Aplicación de la tecnología RFID pasiva al inventario de señales de carretera** basado en la demostración teórica de la viabilidad de la utilización de dicha tecnología, no solo al entorno de carreteras, sino también, a entornos urbanos de una forma eficiente y sin afectar al flujo del tráfico en cada caso. Esto posibilita, por un lado, y debido a que no necesita batería, la minimización de los costes tanto de operación como de mantenimiento, lo que permite afrontar los retos de bajo consumo y bajo coste y, por otro lado, la implementación de servicios adicionales en función de la codificación del EPC de los tags detectados, tales como

la navegación o sistemas de comunicación I2V (Infraestructure-to-vehicle), lo que, junto alta capacidad de computación de la nube, posibilita el desarrollo de aplicaciones y servicios de valores añadidos basados en la explotación de la información de los tags.

6. Sistema IoT para la monitorización de salud en correas de ascensores. Esta aportación se puede dividir en dos partes:
 - a. Aplicación de la **reflectometría** en el dominio temporal (TDR) a la monitorización y el diagnóstico de las correas de los ascensores permitiendo la inspección de las mismas de forma no invasiva y con sistemas de bajo coste.
 - b. Aplicación de técnicas de **Compressive Sensing** permitiendo la reducción de la tasa de muestreo y aumentando simultáneamente la sensibilidad y resolución en la localización del error sobre las correas bajo diagnóstico, todo ello con un sistema de bajo coste. Por un lado, la reducción de la tasa de datos implica la minimización de la cantidad de datos a transmitir a la *nube* y, por tanto permite reducir el consumo de potencia. La alta capacidad de procesamiento de la *nube* permite aplicar algoritmos de reconstrucción de señal sin perder información respecto de la implementación original. Por otro lado, se puede mantener la tasa de datos y, utilizando la potencia de cálculo de la nube, aumentar significativamente la precisión del algoritmo de detección y localización de fallos. En este último caso, se demuestra cómo, utilizando el ADC embebido de un Cortex-ARM de 32 bit muestreando a 1 Ksps, la precisión en lo que a la localización de fallos se refiere, aumenta de 70m en el caso de no utilizar *Compressive Sensing*, a 9,1 cm en caso de usarlo.
7. Desarrollo de un sistema de monitorización de salud estructural (SHM) de bajo consumo, bajo coste y con arquitectura IoT, basado en algoritmos de coeficientes autorregresivos y entradas exógenas (AR-ARX). Estos algoritmos suponen una gran carga, tanto para almacenamiento como para el procesamiento de los datos, lo que hace necesaria la utilización de las capacidades *Big Data* y *Fog Computing* que ofrece IoT para detectar comportamientos estructurales anómalos o localizar y pronosticar daños estructurales de forma precisa.

Las aportaciones originales anteriormente comentadas resultan ser el elemento principal sobre el que se sustentan las soluciones innovadoras desarrolladas, las cuales han dado lugar a 1 patente nacional y a numerosas publicaciones internacionales

0.4. Estructura de la Tesis

Tras descripción de la motivación que da lugar a esta Tesis Doctoral, la metodología de trabajo seguida y la breve introducción realizada en el presente capítulo, el resto de la Tesis se estructura de la siguiente forma:

1. **Capítulo 1:** Está dedicado a la descripción y caracterización del marco de trabajo en el que se desarrollan los desarrollos realizados. Para ello se presenta *Internet of Things* como el paradigma que aporta las soluciones tecnológicas a las necesidades de la sociedad actual y futura. A continuación se describen tanto su arquitectura como algunas implementaciones novedosas como son las *Smart City* y el *Industrial IoT*. Esto nos permite identificar los retos que presenta la tecnología y seleccionar una serie de casos de uso que los pongan de manifiesto y sirvan como hipótesis de partida para los sistemas a desarrollar a lo largo de esta Tesis.
2. **Capítulo 2:** Pone de manifiesto el impacto del transporte de mercancías en la sociedad actual y la tendencia tanto de la inversión pública como privada a mejorar las infraestructuras de telecomunicación como vía para la optimización de los servicios ofrecidos a los usuarios y a los propios implicados en la cadena logística. Posteriormente se aborda el diseño de un sistema de monitorización y actuación sobre contenedores de mercancías abierto, distribuido y de bajo coste con capacidad para monitorizar hasta 6 variables físicas (humedad,

temperatura, luminosidad, posición GPS, estado de las puertas y detección de movimiento), además de presentar una interfaz abierta para la conexión de cualquier sensor del catálogo de mercado con la adaptación correspondiente, enviar los datos hacia el exterior del contenedor y posteriormente a la nube a través de redes de comunicación local, móvil o satélite en función de la disponibilidad de cada una de ellas. Es ya en la nube donde se ofrecen los servicios a los usuarios y se proporciona una interfaz abierta para el desarrollo de servicios de valor añadido adicionales por parte de terceros. El sistema resulta validado en el corredor intermodal Madrid – Sevilla – Canarias, en el que está implicado el transporte en camión, tren y barco.

3. **Capítulo 3:** Como consecuencia del Capítulo 2, en el Capítulo 3 se afronta el reto de sustituir la comunicación cableada para la extracción la información del interior de los contenedores y sustituirla por canal de transmisión por ultrasonidos. Para ello se selecciona la tecnología de transductores piezoeléctricos a 40 KHz y la modulación DBPSK. En base a esto, se lleva a cabo una primera implementación con capacidad para superar el reto al conseguir transmitir información entre el interior y el exterior de los contenedores. Sin embargo, el marco IoT implica la minimización del consumo tanto como sea posible con el fin de maximizar la vida de los dispositivos y reducir el coste de mantenimiento de estos sistemas. Por ello se abren dos nuevas líneas de investigación, materializadas en dos implementaciones diferentes
 - La primera de ellas lleva a cabo una reducción del consumo de potencia basada, principalmente en la implementación de un modulador DBPSK puramente digital, de bajo coste y bajo consumo, aprovechando la respuesta del canal de comunicaciones como un filtro paso bajo. La selección de la modulación DBPSK se realiza de forma justificada según los resultados obtenidos frente a las demás modulaciones estudiadas. Los resultados evidencian una mejora del consumo de 2 órdenes de magnitud, manteniendo el ancho de banda.
 - La segunda implementación parte de la caracterización del canal donde, utilizando como medio de fijación de los transceptores una resina epoxi, aparece una nueva banda de frecuencias sobre los 360 KHz que cuenta con más ancho de banda y mayor ganancia. Se implementa sobre esta banda una modulación OFDM con 128 portadoras D8PSK lo que, unido a la utilización de la nueva banda, supone una disminución del consumo respecto al sistema original de hasta 3 órdenes de magnitud y una mejora del ancho de banda de unas 20 veces.
4. **Capítulo 4:** Con la experiencia de las implementaciones anteriores, en este capítulo se aborda el uso de la IoT en tres aplicaciones diferentes que ponen de manifiesto distintos retos tecnológicos. Para la superación de estos retos se utilizan diferentes técnicas originales, aplicadas a tres sistemas innovadores que permiten extender el paradigma de la IoT a dichas aplicaciones:
 - **Inventariado de carreteras:** Por un lado se lleva a cabo el estudio (teórico y basado en modelos) de viabilidad de aplicación la tecnología RFID pasiva para el inventario de carreteras, por las bondades que presenta esta tecnología en un marco IoT, resultando exitoso dicho estudio. Posteriormente, se pasa al desarrollo del sistema y su posterior validación, tanto experimental como en campo, corroborando los resultados arrojados por el análisis teórico y abriendo nuevas posibilidades de aplicación como navegador o sistemas de comunicación I2V.
 - **Monitorización de salud de correas de ascensores:** Por otro lado se implementa un sistema para la monitorización del estado de salud de las correas de los ascensores basado en la teoría de la reflectometría. El sistema es optimizado implementando *Compressive Sensing* como técnica habilitadora para, utilizando la elevada capacidad computacional de la nube y una electrónica de adquisición de bajas prestaciones, minimizar la cantidad de datos enviados a la nube (con la consecuente reducción del

- consumo de potencia) y mejorar significativamente la resolución del sistema, pasando de 70m del diseño inicial a los 9,1 cm del definitivo.
- **Monitorización de Salud Estructural:** Finalmente se incluye el diseño de un sistema SHM orientado a la arquitectura IoT, de bajo coste, distribuido y bajo consumo que aprovecha la capacidad computacional disponible en IoT para aplicar complejos algoritmos. El algoritmo implementado está basado en coeficientes autorregresivos y autorregresivos con entradas exógenas (AR-ARX) que, a partir de las vibraciones de la estructura, tiene capacidad para detectar comportamientos anómalos y daños estructurales de forma fiable.
5. **Capítulo 5:** Por último, se presenta el Capítulo 5 que recoge las principales conclusiones extraídas de las investigaciones y desarrollos llevados a cabo en la presente Tesis Doctoral, así como las posibles líneas de investigación con las que continuar.

CAPÍTULO 1. IoT COMO PARADIGMA DE INTERCONEXIÓN. VISIÓN GENERAL E HIPÓTESIS DE PARTIDA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

INTERNET OF THINGS (IOT) COMO MARCO DE TRABAJO. ESTADO DEL ARTE Y EVOLUCIÓN	46
ARQUITECTURA DE SISTEMAS IOT	49
IMPLEMENTACIONES IOT: SMART CITY E INDUSTRIAL IOT	51
IDENTIFICACIÓN DE RETOS TECNOLÓGICOS EN EL MARCO IOT	53
HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	54
REFERENCIAS.....	56

Este capítulo tiene como objetivo establecer la hipótesis de partida de la Tesis Doctoral, determinando los principales retos tecnológicos a vencer para el desarrollo e integración de sistemas de monitorización y sus servicios en sistemas de IoT. Para ello, la primera sección recoge el estado del arte del paradigma del IoT y su evolución. Posteriormente se describe la arquitectura del modelo de capas sobre el que se sustentan, tanto los sistemas integrados en IoT, como el propio IoT. Posteriormente, tras analizar las implementaciones de más relevancia, como las Smart City y el Industrial IoT, se analizan los retos tecnológicos que propone la implementación y despliegue real del paradigma. Finalmente, basado en dichos requisitos se fija la hipótesis de partida de esta Tesis Doctoral que sustentará el objetivo general de esta investigación.

1.1. Internet of Things (IoT) como marco de trabajo. Estado del Arte y Evolución

Los continuos avances en la tecnología de sensores y, más concretamente en sensores inalámbricos, sumado a la tendencia a la estandarización de los protocolos que los comunican, cada vez hacen más factible la idea de disponer de todos los datos de estos sensores en cualquier lugar y en cualquier momento. Podemos afirmar, por tanto, que estamos a las puertas del paradigma del IoT descrito como [1 - 1]: “The Internet of Things allows people and things to be connected Anytime, Anyplace, with Anything and Anyone, ideally using Any path/network and Any service”. En la Figura 1 - 1 ([1 - 2]) se ilustra el concepto de IoT tal como se ha descrito en la frase anterior.

Este avance ha dado lugar a sistemas con capacidad, no solo para sensar, sino también para procesar y comunicar los datos de una forma eficiente, resultando en los sistemas conocidos como Redes de Sensores Inalámbricos o WSN (*Wireless Sensor Networks*). Sin embargo, la necesidad de reducir el consumo de potencia de los nodos sensores supone un límite para su capacidad de cálculo, que en la mayoría de los casos no es suficiente para realizar la totalidad del procesamiento necesario. Por tanto, aparece la necesidad de transmitir parte de esa información a sistemas remotos donde realizar dicho tratamiento. Esto da lugar a lo que hoy en día se conoce como *Internet of Things* (IoT).

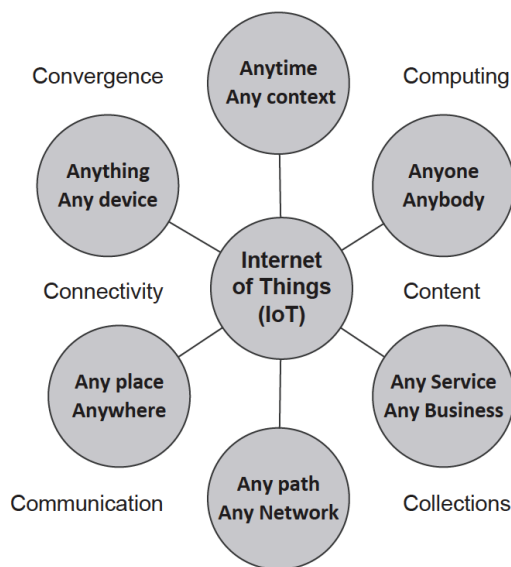


Figura 1 - 1.. Descripción general de IoT

En las WSN, la capa de sensores y actuadores es la encargada de recolectar la información del ambiente (temperatura, humedad, radiación, vibración, luminosidad, etc.) y actuar sobre el mismo. Habitualmente, esta información recogida es procesada localmente con el objetivo de minimizar la cantidad de datos a transmitir inalámbricamente y, por tanto, minimizar el consumo de potencia. Posteriormente, la información recibida en el/los nodo(s) remoto(s) es procesada por sistemas que pueden contar con la capacidad de cálculo deseada, pudiendo hacerlo de forma rápida y precisa. Posteriormente es posible el desarrollo de servicios (localización, monitorización, tracking, etc.) que exploten esa información y aporten valor a la información recogida.

Muy probablemente, tal y como se comenta en [1 - 4], el término Internet of Things, en ocasiones también llamado Internet of Everything [1 - 5][1 - 6], fue acuñado por el cofundador de AutoID Center, Kevin Ashton, en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) como título de una presentación en el año 1999. En ese caso se vinculaba la idea de la identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency IDentification, RFID) en base a un *Electronic Product Code* (EPC) como un identificador RFID unívoco mundialmente como reemplazo de los códigos de barra UPC.

En 2008, un grupo de unas 50 compañías, abanderadas por Cisco, Bosh, Sun, Google o Fujitsu, crearon la alianza IPSO con el objetivo de promover el uso del *Internet Protocol in Networks of Smart Objects* y caminar en la dirección del paradigma IoT [1 - 7]. Se considera que a partir de este momento IoT había nacido pues, ya en esa fecha habían irrumpido los smartphones, tablets, etc. y existía un número de “cosas u objetos” conectados a internet mayor que el número de personas, alcanzando los 12,5 billones de dispositivos conectados frente a una población mundial de 6.8 billones de personas (Figura 1 - 2 [1 - 8]).

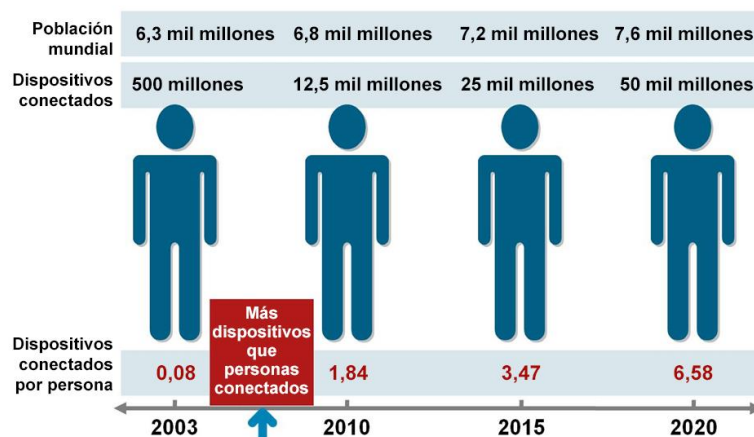


Figura 1 - 2.. Nacimiento de la IoT. Dispositivos vs Personas conectados

Si bien IoT como concepto aparece en 1999, hasta 2005-6 no comienzan a generarse las primeras conferencias y congresos dedicadas al despliegue de la tecnología, apareciendo a partir de ese momento las primeras propuestas tecnológicas para el alcance del paradigma.

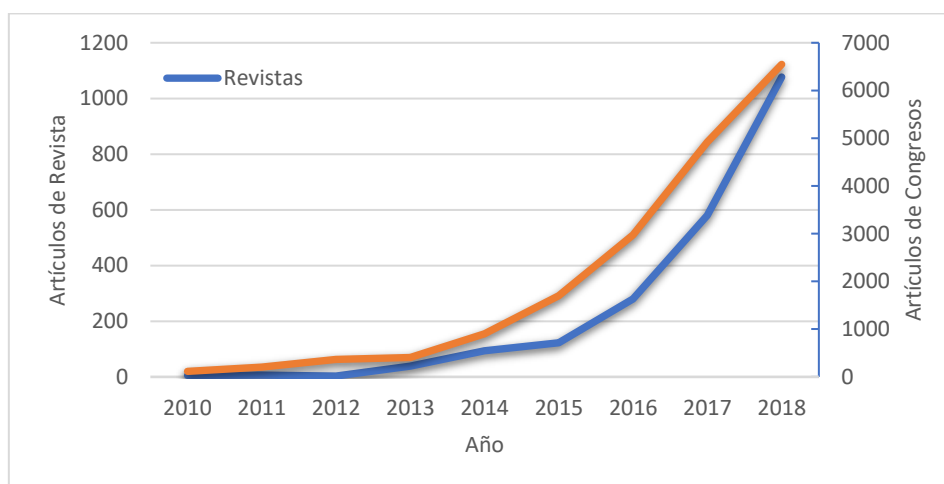


Figura 1 - 3. Evolución de artículos (naranja) y congresos (azul) sobre IoT en IEEE

Tal y como se puede ver en la Figura 1 - 3, tanto el número de artículos en revistas científica con el de conferencias y participaciones en congresos IEEE cuentan con un crecimiento exponencial desde el año 2010 cuando el número de artículos en revista era de 5 y el número de artículos de congresos 116 hasta 2018 en el los alcanzaron valores de 1077 y 6548 respectivamente.

La figura anterior marca una tendencia en la que se refleja que la importancia del IoT en la comunidad científica ha crecido de forma muy abrupta, lo cual no es sino reflejo de las capacidades que este

paradigma ofrece para cubrir las necesidades tecnológicas que demanda el mercado y que tiene su origen en las necesidades y demandas de los usuarios.

Esta demanda de los usuarios, como es de esperar, tiene una repercusión económica en el mercado de los dispositivos IoT. Tal y como se muestra en la Figura 1 - 5, el mercado IoT pasó de unos 150 Billones de US\$ en 2018 a más de 300 en 2019 y se prevé que supere los 1100 Billones de US\$ en 2026. Como no puede ser de otra forma, el aumento del mercado (Figura 1 - 5 [1 - 10]) viene de la mano del incremento del número de dispositivos conectados, lo cuales pasan de 23 a 75 Billones en el mismo periodo (Figura 1 - 4 [1 - 9]).

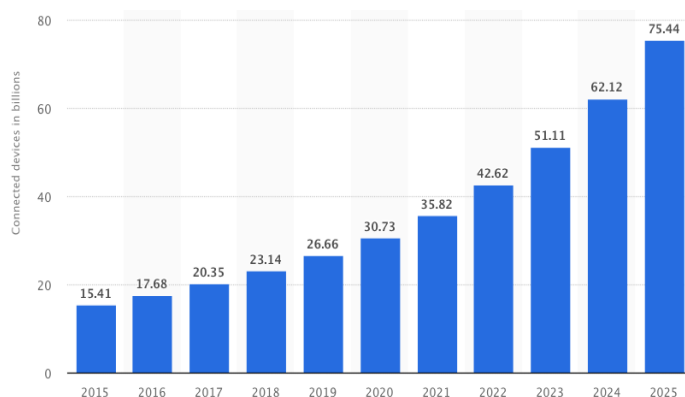


Figura 1 - 4. Número de dispositivos Internet of Things (IoT) conectados

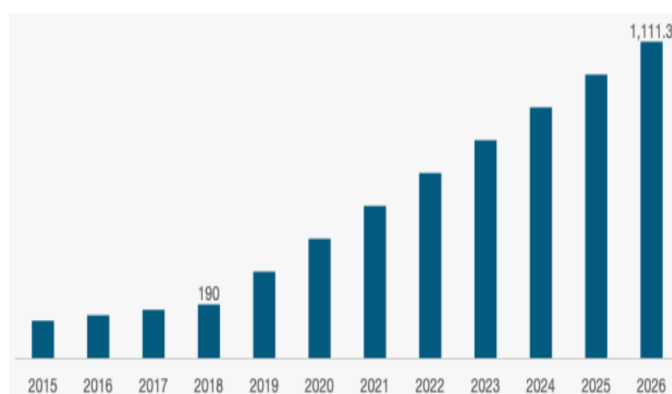


Figura 1 - 5. Mercado global IoT (Billones de US\$)

Uno de los factores fundamentales para el crecimiento de IoT en su más amplio sentido (uso, dispositivos y personas conectados, mercado, etc.) y, cuya consecuencia principal es que exista un mayor número dispositivos conectados que de personas, es que se establecen comunicaciones, no solo entre personas, sino entre máquinas, apareciendo el término *Machine-to-Machine Communication* o M2M. Por tanto IoT puede ser descrito como una infraestructura global para la comunicación entre personas y/o máquinas, que habilita servicios en base a esa información utilizando las tecnologías de comunicación e información (TICs). Para ello, tal y como afirma [1 - 11], las capacidades que ofrece IoT suponen un impacto significativo en la sociedad actual, posibilitando nuevos servicios y oportunidades para mejorar cualquier aspecto de la vida diaria, imposibles de ofrecer hasta el momento.

Muchas de esas nuevas capacidades pueden ofrecerse debido a que IoT está concebido como una red heterogénea, compleja, fiable, adaptativa y segura que permite la conexión de dispositivos u objetos también heterogéneos [1 - 12].

Por tanto, basándonos en la tendencia marcada tanto por la investigación científica como por el mercado actual y previsto, el paradigma IoT se muestra como una realidad actual y de futuro para cubrir las necesidades demandadas por los usuarios.

Llegados a este punto es necesario plantearse cuáles son los requisitos, características o funcionalidades principales que ha de satisfacer cualquier dispositivo para poder considerarse bajo el paraguas de IoT. En este sentido [1 - 7] propone tres características fundamentales:

- Adquisición fiable: Cualquier objeto que desee ser considerado como un “*thing*” dentro del IoT debe tener la capacidad de adquirir la información fiable y eficientemente del lugar donde es instalado.
- Comunicación fiable: Una vez que los datos son tomados, el objeto debe tener la capacidad de enviar dicha información a través de alguna de las redes disponibles y que formen parte de IoT. Dicha red, que puede ser cableada o inalámbrica, debe ser suficientemente robusta y fiable para transmitir correctamente los datos de los sensores en cualquier momento.
- Procesamiento inteligente: Una vez los datos son transmitidos por el objeto a la “nube”, éstos deben ser procesados. Se debe garantizar que el sistema puede realizar el procesamiento y las acciones para las que ha sido diseñado.

Si bien, el consumo energético no es un requisito fundamental, en tanto que un objeto puede ser alimentado desde la red eléctrica, en el caso en que se trate de un objeto inalámbrico, éste debe presentar un consumo de energía muy reducido, maximizando tanto como sea posible su autonomía con el fin de minimizar los costes de mantenimiento del mismo.

Este factor es muy importante debido a que los sistemas IoT inalámbricos son, por regla general, muy económicos como consecuencia de la tendencia de la electrónica a reducir sus costes. Esto hace que, muy a menudo, el coste de la batería, así como el mantenimiento y sustitución de la misma a lo largo de la vida útil del objeto sea el factor dominante sobre el precio del propio dispositivo.

Tanto es así, que desde 2015 [1 - 13] aparece una nueva línea de IoT denominada *Battery-Less IoT*, en la que se presenta como uno de los principales problemas del despliegue IoT la imposibilidad de contar con las baterías necesarias para la cantidad de dispositivos previstos. *Battery-Less IoT* propone dotar a cada uno de los dispositivos con la capacidad de autoalimentarse a través de sistemas de recolección de energía o *Harvesting*.

Internet of Things es concebido como un paradigma global sobre el que se ofrecen servicios de cualquier tipo orientados a campos muy distintos como pueden ser la industria, los negocios, las ciudades inteligentes, el estado o seguridad (nacional o internacional), entre otros. Se trata de una filosofía que permite la comunicación de dispositivos y redes totalmente heterogéneos así como la integración de datos de cualquier naturaleza para su tratamiento conjunto. Por tanto, para lograr la integración y la interoperabilidad de todas las tecnologías que pueden ser parte de la implementación del paradigma es necesaria la existencia de la definición una arquitectura común que lo soporte.

1.2. Arquitectura de sistemas IoT

Desde la aparición del término IoT, son muchas las iteraciones realizadas para la definición de su arquitectura. Tanto es así, que en la bibliografía existente podemos encontrar numerosos artículos donde la definición de la arquitectura IoT es el núcleo fundamental de los mismos. Sin embargo, la mayoría de ellos afronta la definición de estas arquitecturas desde el punto de vista de un servicio o tecnología concreta. Algunos ejemplos:

- En [1 - 14], se realiza una de las primeras propuestas de arquitectura IoT, la cual se orienta a servicios (*Service-Oriented Architecture, SOA*).

- [1 - 15], propone una arquitectura desde el punto de vista de recursos y servicios web (*Web Services*).
- [1 - 16], presenta una arquitectura orientada a ofrecer un servicio RFID seguro.
- [1 - 17], lo enfoca desde el punto de vista de PLCs⁴.
- [1 - 18], lo orientada a la calidad de servicio
- [1 - 19], define una arquitectura orientada a los servicios de cuidado de la salud.
- [1 - 20], una arquitectura orientada al *Fog Computing* y 5G
- [1 - 21], se centra en aplicaciones críticas, entre otras.

Sin embargo, todas las definiciones anteriormente tienen como denominador común que están sustentadas por una definición de la arquitectura global que soporta la implementación de todas ellas a un nivel de abstracción menor.

La bibliografía existente al respecto, [1 - 2][1 - 11][1 - 12][1 - 22] entre otros, coincide en definir la arquitectura general IoT como una estructura vertical compuesta por cuatro capas fundamentales: Capa de sensado, capa de comunicación, capa de datos y capa de aplicación [1 - 11], aunque existen casos [1 - 23] en el que la división de capas no es exactamente la misma (capas de sensado, red, servicios e interfaz), si bien los servicios ofrecidos por cada una de ellas son prácticamente análogos. La Figura 1 - 6 [1 - 24] muestra la arquitectura IoT de 3, 4 y 5 capas que engloba toda las anteriormente comentadas.

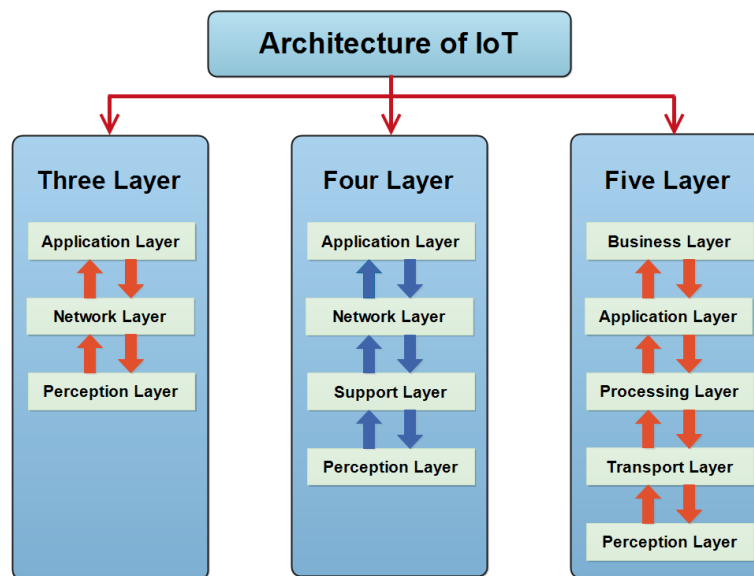


Figura 1 - 6. Arquitectura IoT de 3, 4, y 5 capas

La capa de sensado es la capa de nivel inferior y es la encargada de la recolección de datos y variables físicas del entorno (o proceso) en el que se encuentre ubicado cada uno de los sensores que la componen. Estos sensores pueden ser de cualquier naturaleza (analógica o digital) y puede medir cualquier característica física, como sensores RFID, NFC, redes de sensores inalámbricos, GPS o incluso conjuntos de estos que monitoricen un elemento mayor y que pueda ser considerado un todo, como puede ser un puente, un edificio, un coche o una vivienda.

⁴ Programmable Logic Controller.

A nivel de comunicaciones, dentro del marco IoT tienen cabida tanto las redes locales (*Local Area Networks*, LAN) o las redes extensas (*Wide Area Network*, WAN) y son las encargadas de transportar la información recogida por los sensores hacia el servidor de destino en la nube. Como no puede ser de otra forma, los protocolos y estándares de comunicación pueden ser tan variados como se necesite para la aplicación en cuestión, abarcando desde la tecnología móvil 3G, 4G, NB-IoT, 5G, a las redes PAN⁵ (6LoWPAN, Bluetooth, ZigBee, Sigfox, etc.), satélites o microondas entre otras. Uno de los factores que hacen posible la escalabilidad del IoT es la integración de nuevos sensores en las redes de comunicación desplegadas, sin necesidad de desplegar una nueva red por cada aplicación o servicio que se desee ofrecer.

La capa de datos está compuesta por una serie de repositorios, servidores y/o bases de datos cuya función principal es almacenar la información recogida por la capa de sensado y transportada por la red de comunicación hasta su ubicación. Debido al tamaño de las redes de sensores y, por tanto, de la cantidad de información recogida, es necesario que estos recursos sean capaces de ofrecer al usuario una capacidad de cálculo adecuada a los servicios que se deseen ofrecer posteriormente. Es precisamente la necesidad de procesar grandes cantidades de datos lo que origina la aparición y desarrollo de nuevas tecnologías de análisis y procesamiento de datos como *Big Data*, *Data Mining*, *Cloud Computing* o más recientemente el *Fog Computing*. No obstante el análisis de estas técnicas de procesamiento de datos no es parte del alcance de esta Tesis y por tanto no se profundizará en ello.

Finalmente la capa de aplicación es la encargada de alojar las aplicaciones y servicios desarrollados para ofrecer, en función de los datos recolectados, las capacidades deseadas a los usuarios.

Adicionalmente, aparece una nueva capa transversal que ofrece los servicios de seguridad a cada una de las capas anteriormente comentadas. Este es un factor muy importante debido a la naturaleza de la información que viaja por la red y es alojada en los servidores, la cual podría ser especialmente sensibles en temas como la salud personal, la seguridad vial o la estabilidad y la seguridad de una nación. Al igual que se ha comentado sobre las técnicas de procesamiento de la señal, la capa de seguridad no es objeto de esta Tesis.

Por otra parte, es importante destacar, que, aunque en la descripción de la arquitectura de red se tome como referencia el flujo de información en la dirección capa de sensado hacia la capa de aplicación, el flujo inverso también existirá, lo que habilita la posibilidad de controlar sistemas y actuadores, tales como motores, interruptores, etc., remotamente.

1.3. Implementaciones IoT: Smart City e Industrial IoT

Generalmente, la bibliografía se refiere al término IoT como la arquitectura que posibilita la implementación del paradigma definido, sin hacer referencia al alcance del mismo. Este alcance puede abarcar desde el despliegue de un sensor aislado en una red cuya información no se integra con la de ningún otro sensor a la integración de la totalidad de los sensores desplegados a nivel mundial y que los presentaría como un todo, como una entidad. En este último caso nos estaríamos refiriendo al término *Smart Earth* [1 - 11]. En un punto intermedio se sitúa el concepto que da título a esta sección: *Smart City*.

Aunque el concepto de Smart City puede ser interpretado de distintas formas [1 - 5], generalmente se trata de integrar la información de cada uno de los sensores desplegados en una ciudad para dotarla de inteligencia, de forma que los servicios ofrecidos en base a la información recogida por los sensores

⁵ Personal Area Network

ayude a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, mejorando los servicios públicos, la gestión del tráfico, los sistemas sanitarios, la seguridad de la ciudad, la gestión de los espacios, etc.

A nivel de arquitectura, existen diversas propuestas como [1 - 11], que propone una arquitectura de red perfectamente compatible con la arquitectura de 4 capas comentada en el punto 1.2, la cual se muestra en la Figura 1 - 7 [1 - 11].

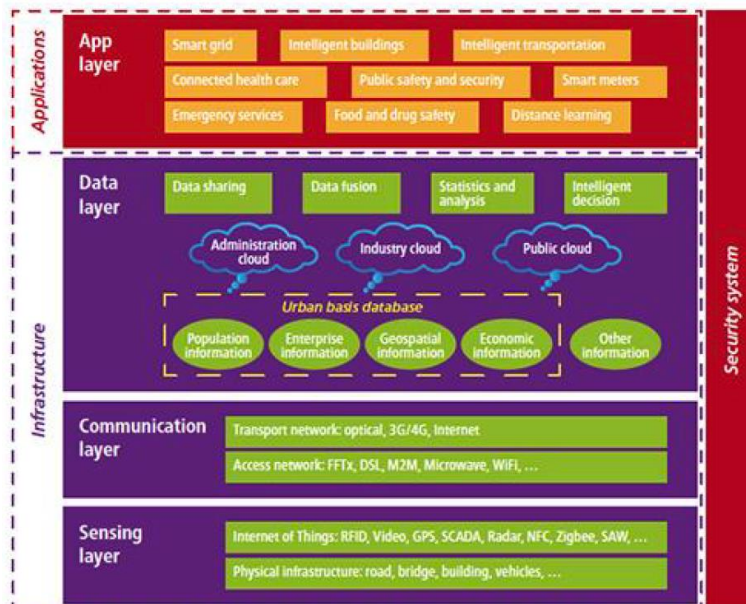


Figura 1 - 7. Arquitectura IoT

Por otro lado existen otras propuestas más evolucionadas, como en el caso de [1 - 24] donde se propone una arquitectura distribuida en la que los servicios se comportan de una manera homogénea con el objetivo de poder integrar los resultados de cada uno de ellos y lograr un nivel de integración mayor, utilizando para ello el concepto de objeto virtual. En [1 - 26] se propone una arquitectura similar a la de la Figura 1 - 7, aunque compuesta por tres capas: Sensado, red y aplicación. En la misma línea se presenta [1 - 27].

Algunos ejemplos de Smart City son Santander, Barcelona, Guadalajara [1 - 11], entre otras muchas como Nueva York, Londres, Oslo o Tokio.

En el caso de Barcelona, ya en 2007, desplegó redes WiFi en lugares públicos como museos o centros deportivos para los ciudadanos cuyo objetivo era el desarrollo de aplicaciones basadas en la explotación de la información (*Big Data*) provista por los ciudadanos (accidentes, atascos, estado de espacios públicos, etc.). De la misma manera se han implementado, entre otros, servicios de riego inteligente del parque público basado en la información recogida por sensores ambientales.

Por su parte, Santander, a través del proyecto *SmartSantander*, integró más de 10000 dispositivos, tales como etiquetas RFID, cámaras, sensores, etc. Como resultados, en la misma línea que Barcelona, se desplegó un sistema inteligente de riego de las zonas verdes, se puso a disposición de los usuarios el estado de los parkings de la ciudad, la ocupación de las carreteras y servicios de realidad aumentada basado en el despliegue de más de 2000 etiquetas RFID y códigos QR que ofrecen información a los ciudadanos y turistas.

Aplicando la misma lógica que a las ciudades y las Smart Cities, aparece el concepto de *Industrial IoT* (IIoT) o Industria 4.0 para la aplicación de IoT al marco industrial.

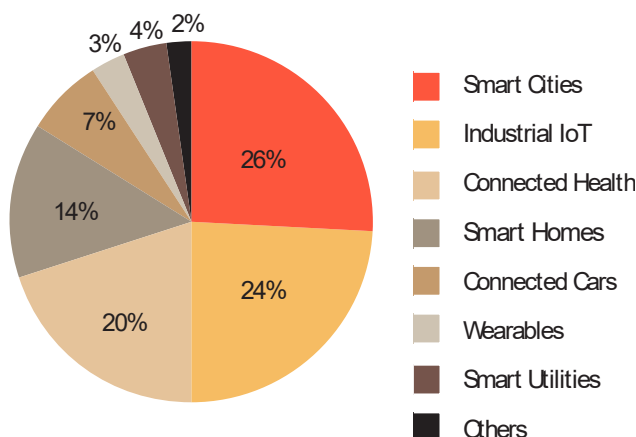
La industria 4.0 está concebida como la cuarta revolución industrial y tiene su origen a partir del año 2010, coincidiendo con el desarrollo de IoT. Esto no es casualidad en tanto que IoT es una de las

tecnologías habilitadoras para esa nueva revolución industrial, claramente identificada con el procesamiento masivo de datos (*Big Data*), el *Machine Learning*, el *Cloud Computing* o la monitorización y el control de la maquinaria industrial a través de servicios IoT. Esto permite a la industria convertirse en industria inteligente, optimizando los procesos realizados por la maquinaria industrial, mejorando la producción y habilitando nuevos servicios de valor añadido como la gestión del inventario industrial o el mantenimiento preventivo.

Al igual que en el caso de las *Smart Cities*, existen numerosos casos experimentales que prueban la optimización de los procesos en varias industrias. Uno de los primeros se realizó en Black and Decker que adoptó una arquitectura IIoT para mejorar el rendimiento de su central de Reynosa (México). Dicha arquitectura estaba basada en la interconexión WiFi de los PLCs de la cadena de control de calidad, logrando una tasa de utilización de los mismos de hasta el 90% así como un incremento de la eficiencia de un 10% y una disminución de hasta el 16% de los defectos de fabricación [1 - 28]. En el mismo sentido se presentan los casos de AW North Carolina [1 - 29][1 - 30] y Hirotec [1 - 31][1 - 32][1 - 33], empresas punteras en sus respectivos sectores que rápidamente han apostado por el IIoT para la optimización de sus procesos y la mejora de sus resultados.

Lo comentado en los párrafos anteriores corrobora que la implantación del paradigma IoT es una realidad en nuestros días y que según el ámbito en el que se aplique adopta un nombre y unos estándares particulares (*Smart City, Industrial IoT*). Además, la penetración de los sistemas IoT en los distintos campos de aplicación se está ampliando sustancialmente, apareciendo nuevas ramas o particularizaciones a medida que se adopta en nuevos campos de aplicación. Ejemplos de ello son el IoT Empresarial (EIoT) o el Social IoT (SIoT), entre otros, aunque todavía de forma minoritaria, tal y como se muestra en la Figura 1 - 8 [1 - 34].

Global IoT Market Share by Sub-Sector



[Source: GrowthEnabler Analysis]

Figura 1 - 8. Mercado IoT por sector

1.4. Identificación de retos tecnológicos en el marco IoT

Si bien la implementación y despliegue de sistemas u objetos IoT es una realidad hoy en día, es cierto que los desarrollos e implementaciones existentes en mercado no cuentan con la suficiente madurez ni presentan las capacidades necesarias para la implementación masiva del paradigma IoT (conectividad, consumo de potencia, seguridad, etc.) y por tanto esto genera una serie de retos tecnológicos que deben ser resueltos a través de la investigación científica con el objetivo de posibilitar un despliegue real y global del paradigma IoT. A continuación se listan los principales retos tecnológicos:

1. Uno de los principales retos que debe asumir la comunidad es la maximización de la vida útil de los dispositivos IoT en lo que a **consumo de energía** se refiere. Esto es debido a que la mayoría de los objetos no cuentan con una fuente de alimentación ininterrumpida e inagotable. Esto supone que, en el mejor de los casos, los objetos deben contener una batería que los alimente. No obstante la vida de la batería es limitada debida, no solo al consumo del propio dispositivo electrónico, sino también al propio envejecimiento de la misma que, en algunos casos, provoca que la batería quede inutilizable antes del final del periodo ofrecido en base al consumo de la electrónica. Por tanto es necesario proponer alternativas que, por un lado, minimicen el consumo de energía y por otro lado aporten nuevos esquemas electrónicos que posibiliten la alimentación de los dispositivos mediante vías alternativas. De la misma forma, es necesario optimizar el proceso de fabricación de las baterías de forma que se minimice el impacto medioambiental que supone.
2. Debido a que estamos ante un paradigma que prevé el despliegue de billones de dispositivo a corto plazo, que estos sean de **bajo coste** es fundamental para que dicho despliegue sea una realidad. Esto implica, tanto al despliegue como a la fase de operación y el mantenimiento de los dispositivos, lo cual está directamente relacionado con el reto 1.
3. En un marco global, el paradigma IoT será implementado, como norma general, en aplicaciones que tomen como entrada un catálogo de magnitudes físicas heterogéneo, por lo que es un reto contar con una **arquitectura de sistema estandarizada** y transparente a los datos adquiridos para su posterior procesamiento.
4. En lo que interoperabilidad se refiere, es muy importante que se produzca una **estandarización de las tecnologías** en tanto que los fabricantes son muchos y muy variados. De no existir dicha estandarización no se podría garantizar que ciertos servicios puedan ser accedidos por todos los dispositivos. En esta línea se han creado distintos grupos de trabajo, como el **Internet Engineering Task Force (IETF)**, dedicados a estandarizar los puntos más importantes para la interoperabilidad como los servicios web tipo REST [1 - 35] o la normalización de la red IPv6 6LoWPAN. Sin embargo, cabe destacar que la mayoría de los sistemas IoT desplegados no cuentan con soporte 6LoWPAN [1 - 35] por lo que se proponen medios alternativos [1 - 36] también basados en IPv6.
5. El **procesado masivo** de datos en IoT recae principalmente sobre el *Big Data*, el cual es definido por las 4V: *Velocity, Veracity, Volume y Variety*. El gran desafío para IoT es la Velocidad en tanto que los datos provenientes de los distintos objetos IoT deben ser procesados en tiempo real para poder ofrecer resultados fiables rápidamente. Por otro lado el Volumen o cantidad de datos es otro de los desafíos de la tecnología, ya que nos encontramos en un marco con millones de datos provenientes de millones de dispositivos diferentes en cada segundo.
6. Por otro lado, otro de los desafíos más importantes que presenta el IoT es la **seguridad**, debido a que a medida que la penetración del IoT en la realidad es mayor, el número de ataques crece y por tanto la seguridad se ve comprometida, como ha ocurrido en el caso de Apple, Sony, etc. [1 - 37]. En este sentido y como primer paso, la *Federal Trade Commission* de los Estados Unidos ha publicado una serie de buenas prácticas [1 - 38] para que las empresas que utilicen el IoT mejoren su seguridad.
7. Finalmente existen otro tipo de retos a solventar en IoT desde el punto de vista **ético y legal**, tal y como se expone en [1 - 39].

1.5. Hipótesis de partida

Partiendo de los retos tecnológicos identificados en el punto 1.4, que dificultan la adopción masiva de arquitecturas IoT, el objetivo de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de una serie de aplicaciones novedosas para dar un paso importante en el avance del estado del arte en la dirección deseada.

Para la implementación de las soluciones novedosas que permiten dar ese paso hacia adelante se han seleccionado aplicaciones suficientemente relevantes desde el punto de vista económico así como desde el impacto que supone para la sociedad el correcto funcionamiento de estas, como son el campo del transporte de mercancía y la monitorización y gestión de las infraestructuras.

Por otro lado, los casos de uso seleccionados ponen de manifiesto todos los retos tecnológicos identificados y a los que se enfrenta la implementación del paradigma IoT.

La primera de las aplicaciones para las que se propone el desarrollo de una solución tecnológica es la monitorización de los contenedores de mercancías, como factor importante en de la economía mundial. Este caso de uso pone de manifiesto la necesidad de minimizar el consumo de potencia de los dispositivos de monitorización/actuación con el objetivo de maximizar su vida útil y minimizar los costes de mantenimiento que supone la sustitución/carga de las baterías integradas. Por otro lado, con el objetivo de minimizar costes de implementación y despliegue es fundamental el uso de electrónica integrada de bajo coste y el diseño de un sistema de fijación que requiera el menor tiempo de instalación posible. Además, se pone de manifiesto la necesidad de integrar un catálogo de medidas muy heterogéneo en un conjunto de redes muy dispar en función de la disponibilidad de cada una de ellas, principalmente dependiente de la ubicación (red local, móvil o satélite). Finalmente se necesita el desarrollo e integración de aplicaciones de alto nivel que permitan la explotación de la información y ofertar los servicios adecuados a los usuarios, en este caso todos los eslabones de la cadena logística, aunque esta parte no es objeto del alcance de estas Tesis.

Otro campo de aplicación con un importante impacto en la sociedad es la monitorización y control de las infraestructuras, las cuales pueden ir desde una carretera, un ascensor, un edificio, una presa o un puente.

La primera aplicación seleccionada en esta dirección es la gestión del inventario de las señales de carretera, debido al alto impacto que tiene en la seguridad vial. En este caso, debido a la cantidad de señales existentes y el área cubierta por estas es fundamental minimizar el coste de operación y mantenimiento de las mismas, los cuales viene determinados principalmente por el coste de las etiquetas y la duración de las baterías respectivamente. Por tanto es necesario el desarrollo de un sistema de inventariado que cuente con dispositivos con tanta autonomía como sea posible, de bajo coste, escalables y que permitan la interoperabilidad, tanto a nivel de redes de comunicación con la nube, como de sensores de distintos fabricantes.

Otro de los casos de uso seleccionados que pone de manifiesto algunos de los principales retos o necesidades que deben satisfacer los sistemas IoT es la monitorización de las correas de los ascensores. En este caso, como en los anteriores, el sistema desarrollado debe ser de bajo coste, de forma que se posibilite su despliegue masivo. A la vez, debido a ese despliegue masivo, el sistema debe ofrecer servicios de monitorización y evaluación del estado de las correas en tiempo real, lo que supone un reto desde el punto de vista de la elevada cantidad de datos a procesar en la capa de aplicación.

Finalmente se selecciona la Monitorización de la Salud Estructural de las infraestructuras civiles como otro caso de uso que pone de manifiesto algunos de los retos tecnológicos que presenta el despliegue masivo de sistemas IoT. En este caso, al igual que en el inventario de carreteras, es fundamental contar con dispositivos desatendidos y que cuenten con tanta autonomía como sea posible con el objetivo de minimizar costes de mantenimiento, a la vez de contar con desarrollos suficientemente económicos que permitan el despliegue masivo de estos dispositivos. Por otro lado la Monitorización de Salud Estructural es aplicable a cualquier tipo de infraestructura, las cuales pueden manifestar su comportamiento en función de unas magnitudes físicas u otras, por lo que el sistema debe permitir la adquisición de cualquier tipo de magnitud que se desee monitorizar. Además, al igual que el resto de sistemas planteados, se debe contar con una capa de aplicación sobre la que desarrollar los servicios

de tratamiento y explotación de la información con la dificultad añadida de la complejidad que presentan los algoritmos estructurales.

Por tanto, como conclusión de este capítulo, estamos ante un Tesis Doctoral eminentemente innovadora y práctica, la cual, tras identificar los retos que presenta la tecnología, identificar aplicaciones y casos de uso que ponen de manifiesto dichos retos, afronta el diseño y desarrollo de varias soluciones novedosas las cuales ofrecen una serie de aportaciones originales al estado el arte actual.

1.6. Referencias

- [1 - 1] IERC-European Research Cluster on the Internet of Things, 2009, “Internet of Things – Strategic Research Roadmap”, http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Cluster_Strategic_Research_Agenda_2009.pdf.
- [1 - 2] Ganchev, I., Zhanlin Ji, & O'Droma, M. (2014). A Generic IoT Architecture for Smart Cities. 25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CICT 2014), . <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0684>.
- [1 - 3] Altayeb, M., Sharif, S., & Abdella, S. (2018). The Internet-of-Things and Integration with Wireless Sensor Network Comprehensive Survey and System Implementation. 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), . <https://doi.org/10.1109/icceee.2018.8515849>.
- [1 - 4] Tayeb, S., Latifi, S., & Kim, Y. (2017). A survey on IoT communication and computation frameworks: An industrial perspective. 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), . <https://doi.org/10.1109/ccwc.2017.7868354>.
- [1 - 5] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/jiot.2014.2306328>.
- [1 - 6] Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. Ad Hoc Networks, 10(7), 1497–1516. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>.
- [1 - 7] Keertikumar M., Shubham M., & Banakar, R. (2015). Evolution of IoT in smart vehicles: An overview. 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT). <https://doi.org/10.1109/icgciot.2015.7380573>.
- [1 - 8] Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf.
- [1 - 9] IoT: number of connected devices worldwide 2012-2025 | Statista. (2016, 27 noviembre). Recuperado 13 octubre, 2019, de <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>.

- [1 - 10] Internet of Things Market Size, Revenue, Expansion | Growth 2026. (2019, 1 octubre). Recuperado 13 octubre, 2019, de <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>.
- [1 - 11] Medina, C. A., Perez, M. R., & Trujillo, L. C. (2017). IoT Paradigm into the Smart City Vision: A Survey. 2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), . <https://doi.org/10.1109/ithings-greencom-cpscom-smartdata.2017.109>.
- [1 - 12] Luong, N. C., Hoang, D. T., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., & Han, Z. (2016). Data Collection and Wireless Communication in Internet of Things (IoT) Using Economic Analysis and Pricing Models: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18(4), 2546–2590. <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2582841>.
- [1 - 13] Rana, S., Prabhakar, T., & Vinoy, K. (2015). An efficient architecture for battery-less terminals for internet of things. 2015 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC), . <https://doi.org/10.1109/aemc.2015.7509256>.
- [1 - 14] Lu Tan, & Neng Wang, (2010). Future internet: The Internet of Things. 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), . <https://doi.org/10.1109/icacte.2010.5579543>.
- [1 - 15] Guinard, D., Trifa, V., & Wilde, E. (2010). A resource oriented architecture for the Web of Things. 2010 Internet of Things (IOT), . <https://doi.org/10.1109/iot.2010.5678452>
- [1 - 16] Tao Yan, & Qiaoyan Wen, (2010). A secure mobile RFID architecture for the Internet of Things. 2010 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security, . <https://doi.org/10.1109/icitis.2010.5689514>.
- [1 - 17] Hsieh, H., & Lai, C. (2011). Internet of Things Architecture Based on Integrated PLC and 3G Communication Networks. 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems, . <https://doi.org/10.1109/icpads.2011.73>.
- [1 - 18] Duan, R., Chen, X., & Xing, T. (2011). A QoS Architecture for IOT. 2011 International Conference on Internet of Things and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing, . <https://doi.org/10.1109/ithings/cpscom.2011.125>.
- [1 - 19] Catarinucci, L., De Donno, D., Mainetti, L., Palano, L., Patrono, L., Stefanizzi, M. L., & Tarricone, L. (2015). An IoT-Aware Architecture for Smart Healthcare Systems. IEEE Internet of Things Journal, 2(6), 515–526. <https://doi.org/10.1109/jiot.2015.2417684>.
- [1 - 20] Khumalo, N., Oyerinde, O., & Mfupe, L. (2019). Fog Computing Architecture for 5G-Compliant IoT Applications in Underserved Communities. 2019 IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC), . <https://doi.org/10.1109/africa.2019.8843414>.
- [1 - 21] Zhang, Q., & Fitzek, F. H. P. (2015). Mission Critical IoT Communication in 5G. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, , 35–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27072-2_5.

- [1 - 22] Grønbæk, I. (2008). Architecture for the Internet of Things (IoT): API and Interconnect. 2008 Second International Conference on Sensor Technologies and Applications (sensorcomm 2008), . <https://doi.org/10.1109/sensorcomm.2008.20>.
- [1 - 23] Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2014). Internet of Things in Industries: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/tii.2014.2300753>.
- [1 - 24] Burhan, M., Rehman, R., Khan, B., & Kim, B. (2018). IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey. Sensors, 18(9), 2796. <https://doi.org/10.3390/s18092796>.
- [1 - 25] Sarkar, C., Nambi S. N., A. U., Prasad, R. V., Rahim, A., Neisse, R., & Baldini, G. (2015). DIAT: A Scalable Distributed Architecture for IoT. IEEE Internet of Things Journal, 2(3), 230–239. <https://doi.org/10.1109/jiot.2014.2387155>.
- [1 - 26] Handong Zhang, & Lin Zhu, (2011). Internet of Things: Key technology, architecture and challenging problems. 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, . <https://doi.org/10.1109/csae.2011.5952899>.
- [1 - 27] Chen, D., Chang, G., Jin, L., Ren, X., Li, J., & Li, F. (2011). A Novel Secure Architecture for the Internet of Things. 2011 Fifth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, . <https://doi.org/10.1109/icgec.2011.77>.
- [1 - 28] Liao, Y., De Freitas Rocha Loures, E., & Deschamps, F. (2018). Industrial Internet of Things: A Systematic Literature Review and Insights. IEEE Internet of Things Journal, 5(6), 4515–4525. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2834151>.
- [1 - 29] Debruyne, J., 2013, “Auto parts manufacturer to add 56 jobs in Durham County” Staff Writer , Triangle Business Journal.
- [1 - 30] Ohnesorge, L. K., 2017, “From its Durham offices, this japanese manufacturer is fighting ransomware worldwide” , Triangle Business Journal.
- [1 - 31] Azorobotics, 2017, “Hirotec selects new remote monitoring platform to enhance operational efficiency and factory quality”.
- [1 - 32] “How IIOT happened at Hirotec Tactical engagements support a strategy to make better use of data” by Kevin Parker, December 2016.
- [1 - 33] Jun, C., Lee, J. Y., Kim, B. H., & Noh, S. D. (2017). Application of core technologies for smart manufacturing: A case study of cost benefit analysis based on modeling and simulation for sustainability. 2017 Winter Simulation Conference (WSC), . <https://doi.org/10.1109/wsc.2017.8248161>.
- [1 - 34] Growth Enabler, “Market pulse report, Internet of Thing (IoT)” <https://growthenabler.com/flipbook/pdf/IOT%20Report.pdf>. Abril 2017.
- [1 - 35] Shahid, N., & Aneja, S. (2017). Internet of Things: Vision, application areas and research challenges. 2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), . <https://doi.org/10.1109/i-smac.2017.8058246>.

- [1 - 36] Jara, A. J, Zamora-Izquierdo, M. A., Skarmeta, A., 2012. "Glowbal IP: An adaptive and transparent IPv6 integration in the Internet of Things". *Mobile Information Systems*, 8(3), 177–197. <https://doi.org/10.3233/MIS-2012-0138>.
- [1 - 37] Weinberg, B. D., Milne, G. R., Andonova, Y. G., & Hajjat, F. M. (2015). Internet of Things: Convenience vs. privacy and secrecy. *Business Horizons*, 58(6), 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.06.005>.
- [1 - 38] FTC Report on Internet of Things Urges Companies to Adopt Best. (2015, 27 enero). Recuperado 13 octubre, 2019, de <https://www.ftc.gov/news-events/press-releases/2015/01/ftc-report-internet-things-urges-companies-adopt-best-practices>.
- [1 - 39] AboBakr, A., & Azer, M. A. (2017). IoT ethics challenges and legal issues. 2017 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), . <https://doi.org/10.1109/icces.2017.827530>.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CONTENEDORES INTELIGENTES IoT, GLOBAL, ABIERTO, DE BAJO COSTE Y BAJO CONSUMO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

INTRODUCCIÓN.....	63
TENDENCIA A MEJORAR LAS INFRAESTRUCTURAS Y TICS APLICADAS A ESTE CONTEXTO.....	64
CONTENEDORES INTELIGENTES COMO ELEMENTOS FUNDAMENTALES EN LA MEJORA DE LA CADENA LOGÍSTICA.....	65
PROYECTO CONTAINER UNITIZED TRACKING SYSTEM (CUTS).....	71
CONCLUSIONES Y PROBLEMÁTICAS DEL SISTEMA CUTS.....	103
REFERENCIAS.....	105

El presente capítulo nace de la necesidad existente en el estado del arte de los sistemas de monitorización de contenedores de contar con un sistema completo, global y abierto y con capacidad para cubrir el conjunto de necesidades requeridas por el marco de trabajo actual. Este marco de trabajo se centra en el transporte de mercancías debido a que trata de un campo que tiene un elevado impacto sobre la economía y la sociedad.

Por ese motivo, en este capítulo se afronta, en primera instancia, una revisión del estado del arte para detectar las necesidades existentes (en el momento de la ejecución de estos desarrollos). Posteriormente, se evalúan los posibles marcos de desarrollo, centrándose fundamental en el paradigma Internet of Things (IoT) como el entorno ideal para afrontar los retos que tecnológicos que presenta el desarrollo de un sistema, no existente en el mercado.

Por otro lado, debido a la naturaleza cambiante del mercado de la sensorización/actuación, como consecuencia de la evolución de los sistemas electrónicos, se aborda el diseño del sistema de monitorización como un diseño abierto, tanto hardware como software, en el que sea posible integrar cualquier sensor que pudiese aparecer en el futuro. Esto garantizaría la constante actualización del sistema, la integración de dispositivos de terceros y escalabilidad del mismo.

Por otro lado, es importante comentar que la implementación del sistema se realiza en el marco del proyecto “Tecnoport 2025. El Puerto del Futuro”, licitado por la Autoridad Portuaria de Sevilla y liderado por la Universidad de Sevilla, junto a un consorcio de empresas como Telefónica, Thales y Portel. Es por esto por lo que, a medida que se acometan los distintos desarrollos a lo largo del capítulo, se especificará qué desarrollos han sido llevados a cabo dentro del alcance de esta Tesis y qué ha sido realizado fuera del alcance de la misma. En cualquier caso, los desarrollos realizados por terceros y que se incluyen en la redacción de este capítulo (incluidos para que el desarrollo del sistema completo esté autocontenido), además de estar identificados, se comentan a muy alto nivel, sin entrar en detalles de implementación.

Finalmente, tras el desarrollo del sistema, éste es desplegado en una cadena intermodal (camión, tren, barco, instalaciones portuarias, etc.) y sometido a pruebas de campo reales. Estas consisten en la realización de varios trayectos en la cadena intermodal Madrid-Sevilla-Canarias, sobre la que se valida el desarrollo realizado.

2.1. Introducción

El transporte de mercancías se ha convertido en una fuente de ingresos muy importante en la economía global llegando a suponer en torno a un 7% del PIB en Europa y casi el 5% de los puestos de trabajo [2 - 1]. Por otro lado, según [2 - 2], durante 2014 el intercambio o transporte de mercancías subió un 2.3% a nivel mundial y el producto interior bruto creció un 2.5% indicando una fuerte correlación entre ambos. Esto pone de manifiesto la importancia del transporte de mercancías y el papel que juega en las economías nacionales o incluso continentales y lo posiciona como sector estratégico. Este es uno de los motivos por lo que la tendencia de las inversiones para la modernización y actualización de la cadena logística es creciente. Por este motivo, la investigación científica es un actor muy importante para conseguir que el transporte de mercancías sea cada vez más eficiente y ofrezca más servicios a todos los actores implicados [2 - 3], es decir, el empleo de diferentes medios de transporte utilizando una única “unidad de carga”, generalmente el contenedor.

Adicionalmente casi el 90% de todo el transporte de mercancías mundial se realiza a través de puertos marítimos y, por tanto, en contenedores [2 - 4]. Este transporte se apoya en distintos medios dando lugar a una cadena de transporte intermodal (Figura 2 - 1).

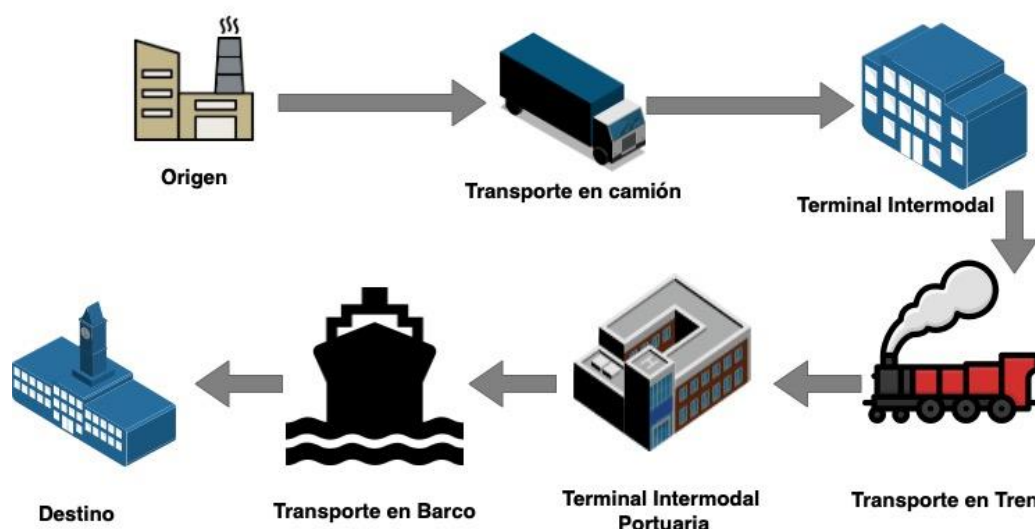


Figura 2 - 1. esquema de cadena de transporte intermodal

Según el Ministerio de Fomento [2 - 24], se define como transporte intermodal al “movimiento de mercancías en una misma unidad o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo”.

El transporte intermodal ha sido uno de las claves para el crecimiento del mercado del transporte y ha dado lugar a nuevos escenarios logísticos ya que no solo puede ser rápido y eficiente, sino que maximiza el rendimiento de las infraestructuras existentes sin necesidad de crear nuevas redes de comunicación. Es así como pueden utilizarse dentro de una única cadena logística carreteras, vías de ferrocarril, y transporte marítimo sin la necesidad de manipular la mercancía y lograr que ésta viaje desde el origen hasta su destino de la forma más rápida, segura, fiable y eficaz posible, por supuesto minimizando costes.

En lo que a la cadena de transporte intermodal se refiere, cabe destacar que, la mayoría del tráfico de mercancías se realiza por transporte marítimo, ya que diariamente se transportan por tráfico marítimo alrededor de 16 millones de contenedores [2 - 4]. Así, como referencia de esta tendencia, según [2 - 5] la flota de contenedores mundial ha triplicado su capacidad en la última década. De este modo, de la misma forma en que la flota de contenedores es cada día mayor, los puertos marítimos están obligados

a optimizar tanto sus instalaciones como sus procedimientos con el fin de dar servicios de calidad y seguir absorbiendo la demanda provocada por el aumento de tráfico.

2.2. Tendencia a mejorar las infraestructuras y TICs aplicadas a este contexto

El incremento de transporte marítimo de mercancías tiene un impacto directo en los medios que soportan el transporte posterior de esos contenedores hasta los nodos intermodales destino, cada vez más cerca al destino de la final de la mercancía. Por esto las administraciones responsables de los medios de transporte, no solo del os puertos, están mejorando continuamente las instalaciones (puertos, vías de tren, carreteras, etc.) tratando de ofrecer más y mejores servicios para mejorar la calidad y obtener mayores beneficios.

Desde un punto de vista puramente económico, los implicados en la cadena logística intermodal son los primeros interesados en contar con instalaciones suficientemente buenas de forma que se garantice tanto la seguridad de la mercancía como la entrega de la misma en tiempo, evitando retrasos y los gastos derivados de los mismos (ruptura de la cadena de transporte, necesidad de incluir el transporte en otro medio, etc.) [2 - 6].

2.2.1. Actualización de Infraestructuras y TICs como elemento de mejora de la eficiencia de los Puertos de Mercancías. Puerto de Sevilla como caso concreto

La mejora de las infraestructuras de los puertos marítimos como elemento para mejorar su rendimiento y productividad es una medida que está tomándose en la actualidad en diferentes puntos, tales como el Puerto de Bilbao que recientemente [2 - 7] ha realizado una ampliación de sus infraestructuras ferroviarias y del espacio para el almacenamiento de contenedores invirtiendo hasta 10M€, lo que supone un aumento de la capacidad hasta 3000 TEUs diarios y una mejora de la eficiencia operativa del transporte ferroviario de hasta un 45%. En la misma línea, la Autoridad Portuaria de La Coruña [2 - 8], los puertos de Vigo [2 - 9] o Murcia [2 - 10], realizan mejoras en su red ferroviaria de forma continua y otros como el Puerto de Gijón, que no cuentan con instalaciones para el tráfico ferroviario, las están desplegando [2 - 11]. Por su parte, la Autoridad Portuaria de Valencia destina hasta 100M€ entre 2018-2020 a mejorar los accesos ferroviarios de los puertos de Valencia y Sagunto [2 - 12], lo que supone el plan más ambicioso actualmente dentro de las terminales portuarias españolas.

A nivel internacional destacan, entre otros, proyectos ambiciosos como el de la Autoridad Portuaria de Vancouver que ha destinado hasta 250 M\$ en la mejora de servicios ferroviarios para transportes de contenedores y en la creación de otros nuevos [2 - 13] en un total de hasta 21 proyectos o el caso del puerto de Colombo (Sri Lanka) [2 - 14] que ha destinado hasta 160 M\$ en la mejora de infraestructuras, sistemas de control y comunicación para optimizar la eficiencia de su red ferroviaria.

Pero la mejora de la eficiencia de los puertos no pasa solo por la mejora de las infraestructuras civiles o de transporte, sino también la de sus infraestructuras TICs. Claro ejemplo de ello es el proyecto Smart Viport (en ejecución) en el que se realizará una transformación digital en el puerto de Vigo dando acceso a los usuarios a la información de la mercancía, centralizar los trámites portuarios, el seguimiento en tiempo real de la mercancía, digitalizar la documentación, monitorización de los consumos energéticos y la consulta on-line de la facturación de los usuarios [2 - 15].

Otro ejemplo es el proyecto europeo Smart Port [2 - 16] a través del que el puerto de Málaga y otros puertos del Mediterráneo y el Estrecho de Gibraltar tratan de adaptar el concepto de "Smart City" a "Smart Port".

Destacable es el caso del proyecto smartPORT llevado a cabo por el puerto de Hamburgo (el tercer puerto mayor de Europa) que apuesta por las TICs para la gestión inteligente del puerto centrándose en varias áreas como la planificación de los procesos logísticos, la monitorización y la gestión de la energía disponible, la monitorización de los sistemas de control del puerto así como el tracking de los buques en tiempo real [2 - 17].

El Puerto de Sevilla, que forma parte de la Trans-European Transport Network (TEN-T), concretamente se ubica dentro de la llamada Eurovía del Guadalquivir (E.60.20) es un caso especial debido a que se trata del único puerto marítimo de interior de España y su factor más importante es su pertenencia al corredor logístico Madrid – Sevilla – Canarias. Este puerto supone un elemento estratégico dentro del corredor por tratarse de una red intermodal en la que las mercancías provenientes/destino Madrid se gestionan sobre tráfico ferroviario mientras que, el tráfico con las Islas Canarias es marítimo.

Por este motivo y, según la tendencia de los últimos años, la APS adoptó como solución estratégica el desarrollo de un plan de actualización a largo plazo de sus infraestructuras para una mejora de los servicios ofrecidos en lo que se denominó “TECNOPORT2025. Puerto del Futuro”[2 - 21][2 - 22].

Visto desde alto nivel, la solución pasa por el despliegue de una serie de tecnologías habilitadoras, basadas en la arquitectura de capas IoT, que, apoyadas sobre redes de comunicación heterogéneas y una plataforma de servicios integrados, dan soporte a los tres subproyectos llevados a cabo: CUTS, FPS y eRIO.

Dos de los tres paquetes principales del proyecto estaban destinados a la mejora de infraestructuras de transporte ferroviario (*Ferro Port System* - FPS) y a través del canal navegable del Guadalquivir desde las instalaciones de la APS en Sevilla hasta su desembocadura en Sanlúcar de Barrameda (Cádiz) (*e-River Information and Optimization* - eRIO). Por su parte, el subproyecto CUTS (*Container Unitized Tracking System*) está enfocado al desarrollo de una plataforma abierta y de bajo consumo para monitorización/actuación de contenedores de mercancías, convirtiéndolos en elementos inteligentes de la cadena logística.

2.3. Contenedores Inteligentes como elementos fundamentales en la mejora de la cadena logística

Los avances en los sistemas de información y la mejora de las redes de comunicación, junto con la tendencia al alza de la economía global, han contribuido a asumir objetivos mayores y más ambiciosos dentro de la cadena logística de transportes, apoyándose para ello en las TICs y el desarrollo de sistemas de tracking de contenedores de mercancías.

En ese sentido, son muchos los sistemas de tracking de mercancías que se han desarrollado, aunque aún no se ha llegado a uno estandarizado que abarque la red logística de forma global, sin importar el medio de transporte, el operador o el país.

En la línea de la definición de IoT, en [2 - 25], se pone de manifiesto la importancia del papel que juegan las redes de comunicación dentro del transporte de mercancías en general y, más concretamente, en el tracking de mercancías. De la misma manera se refleja la necesidad de tender a modelos estandarizados y globales, en los que tenga cabida información de distinto tipo, generada por distintos entes y que pueda integrarse en servicios comunes que los distintos actores puedan explotar y consumir según sus necesidades. De esta forma, se dotaría a cada participante en el transporte de la mercancía (transportistas, cargadores, propietarios, vendedores, etc.) de información y herramientas con los que optimizar los procesos llevados a cabo y por tanto repercutir positivamente en la optimización de los mismos, tal y como se recoge en [2 - 15] - [2 - 20].

Por tanto, extrapolando lo comentado en los párrafos anteriores a todos los implicados en la cadena logística, la aplicación de las TICs sobre el transporte de mercancías en redes intermodales ofrece una serie de valores añadidos a toda la cadena logística que suponen una optimización de los procesos y metodologías aplicadas, recursos destinados, etc. Y que por tanto genera beneficios para toda la cadena logística.

2.3.1. Importancia de la presencia de las TICs en los sistemas de monitorización de contenedores

Las conclusiones del punto anterior han dado lugar a que, durante los últimos años, se hayan desarrollado sistemas de información capaz de proveer datos de la mercancía durante su transporte o incluso datos en tiempo real. Esto ha propiciado una carrera protagonizada por las empresas logísticas con el fin de disponer de estas capacidades y ofrecer, tanto a los usuarios finales como al resto de participantes en el transporte de la mercancía, una serie de servicios que garanticen la trazabilidad de la mercancía, así como las condiciones del transporte, que optimicen los recursos destinados o que monitoricen las condiciones de seguridad de la misma.

En esta línea, la búsqueda de la aplicación de las TICs al transporte de mercancías por parte de las propias partes implicadas en la cadena logística hace que cada empresa haya apostado su propia tecnología y por tanto la incompatibilidad entre ellas esté garantizada. Por tanto, el paradigma hoy día, en lo que a un marco IoT se refiere, es dotar al transporte de mercancías de la infraestructura y la tecnología necesaria para hacer del seguimiento de mercancías un servicio global, del que todos los participantes (distintos medios de transportes, distintas navieras, operadores) puedan beneficiarse.

En una cadena intermodal es fundamental la comunicación entre los distintos medios de transporte debido a que un fallo en uno de ellos afecta a los demás. A esto hay que sumarle que las cadenas intermodales no están aisladas en lo que al trayecto de la mercancía se refiere si no que un medio de transporte puede recibir mercancía de muchos otros medios de transporte, como puede ocurrir en un barco atracado en una terminal portuaria a la que llegan mercancías desde cualquier punto y en cualquier medio de transporte (camión, tren, otros barcos, etc.).

Lo comentado en el párrafo anterior implica que la operativa de la terminal portuaria solo puede resultar óptima si todos y cada uno de los actores implicados cumplen perfectamente con la planificación prevista. El mayor buque de carga de contenedores del mundo, el Orient Overseas Container Line, cuenta con una capacidad de casi 22000 TEUs, lo que implica que una elevada cantidad trenes y camiones han de cumplir con la planificación prevista para que el buque pueda cumplir con la operativa sin ninguna incidencia (contenedores que no pueden subir porque han llegado tarde o no han llegado, contenedores dañados, paralizados en aduana, bajo inspección, etc.).

El tracking de mercancías posibilita a los planificadores de los distintos operadores logísticos y demás actores de la cadena a optimizar la operativa de las terminales, centros de distribución, centros de reparto, etc. de una forma eficiente adaptándose a tantas variables como aporten los sistemas de información. Estas variables no tienen por qué estar vinculadas únicamente a la ubicación de la mercancía sino que pueden estar enfocadas a monitorizar las condiciones de viaje de la carga (por ejemplo alimentos en el interior de un contenedor refrigerado) o la custodia de la mercancía (notificando manipulación de la misma), violación de medios de seguridad, etc.

Visto desde el campo de la seguridad, esto abre un abanico de posibilidades enorme para el desarrollo de novedosas aplicaciones imposibles de llevar a cabo en los sistemas de monitorización centrados únicamente en la carga y su posicionamiento. Desde este enfoque, es posible dotar a los sistemas de transporte y los contenedores de sensorización capaz de detectar eventos o situaciones no previstas y ayudar a la depuración de responsabilidades.

El catálogo de sensores disponibles en mercado hoy día es tan amplio que cubre perfectamente cualquier magnitud o evento que se desee detectar en el trayecto de la mercancía, ya sea en el interior del contenedor, en el exterior de este o en el medio de transporte sobre el que viaja. Dentro de estas capacidades pueden detectarse amenazas terroristas, transporte de materiales explosivos, armas, sustancias ilegales, contrabando, armas biológicas o transporte ilegal de personas. De la misma forma es posible detectar si un contenedor ha sido abierto durante su travesía, si la alimentación de un contenedor refrigerado ha sido eliminada, si se ha interrumpido la cadena de frío de los alimentos que transporta, etc.

Por tanto, la tecnología actual, permite el desarrollo de un sistema de monitorización que aporte soluciones a las necesidades no cubiertas en el estado del arte y como tal, a lo largo de este capítulo, se acometerá el desarrollo del sistema de monitorización de contenedores CUTS.

2.3.2. Container Unitized Tracking System (CUTS)

El proyecto CUTS, que surge como respuesta a la necesidad de proveer un sistema de información relacionada con los contenedores de mercancía y ofrecer servicios de valor añadido a los distintos *stakeholders* implicados en la cadena de transporte.

Como ya se ha comentado, desde hace años se han desarrollado multitud de sistemas de tracking de mercancías, pero su penetración en el mercado es muy lenta, debido, principalmente, a que no dan respuesta a las necesidades actuales. La mayoría de los sistemas de tracking de mercancías, hasta hace pocos años, estaban basados en tecnologías de radiofrecuencia (RFID) que monitorizaban contenedores, cajas o pallets cuando éstos pasan por los *checkpoints* correspondientes lo cual cuenta con muchos inconvenientes (cuellos de botella, rigidez de las rutas, etc.). Además, solo aporta solución (limitada) al inventario de contenedores en un punto determinado, pero no ofrece servicios de valor añadido como la monitorización de la carga, el estado de los contenedores o la ubicación de los mismos de forma precisa.

Desde mediados de la primera década de los 2000, aparecen en el mercado sistemas alternativos tales como el TRECS de IBM y MAERSK con capacidad para monitorizar la posición de los contenedores, la temperatura, detección de puertas abiertas, acelerómetros, etc., basándose en el uso de redes de comunicación como ZigBee o Bluetooth y pasarelas GSM. Si bien esta solución está en la línea de CUTS, se ofrece al usuario final a un coste muy elevado que hace que solo sea viable cuando el valor de la carga es muy elevado.

El principal objetivo de CUTS es desarrollar una plataforma abierta para localización y monitorización remota de contenedores en tiempo real. Esta información es provista por una serie de sensores instalados en los contenedores que, a través de una red local IEEE802.15.4 que conecta con la red móvil o satélite (dependiendo de la ubicación), proporciona las condiciones tanto de la mercancía como del contenedor a los servicios de alto nivel [2 - 23].

Como solución integral, CUTS aporta las siguientes funcionalidades principales:

- Geolocalización de los contenedores.
- Monitorización en tiempo real de los sensores instalados en los contenedores a través de medidas periódicas y eventos detectados.
- Actuación sobre el equipamiento desplegado en los contenedores.
- Interfaz abierta para la conexión de sensores/actuadores adicionales.
- API abierto para el desarrollo de servicios de valor añadido.

De esta forma, la integración del sistema CUTS en el paradigma IoT ofrecerá una serie de beneficios principales, tales como:

- Un aumento de la capacidad de toma de decisiones.
- Información en tiempo real a todos los actores interesados en la carga.
- Una interfaz externa para integración de sistemas externos que proporcionen servicios de valor añadido y automaticen las operaciones.
- Bajo costes de explotación, soportados principalmente por la infraestructura que conforma el corredor en cuestión.

Una vez detallada la importancia del transporte de mercancías en la economía global y el impacto de la aplicación de las TICs en el rendimiento de la cadena de transporte intermodal, así como la propuesta de inclusión de los contenedores como elementos activos de la cadena intermodal, este capítulo continuará con el diseño de un sistema de monitorización de contenedores que dé respuesta a las necesidades presentadas y supere los retos tecnológicos que el marco de operación IoT presenta.

2.4. IoT en el transporte de mercancías. Implantación y retos

En el mercado existen multitud de sistemas de monitorización de contenedores que aportan información parcial o sesgada de la localización de los contenedores o las condiciones de viaje de la mercancía, por lo que no hay una visibilidad completa del estado de la carga a lo largo de las rutas intermodal. Esto provoca incertidumbres en tiempos de llegada o en el estado de la carga, lo que da lugar a una escasa capacidad de maniobra a los puntos intermodales (puertos, almacenes, etc.) ante necesidades cambiantes, e implica mayores tiempos de adaptación a las nuevas condiciones. Por tanto, este tipo de situaciones repercuten en el coste del servicio. Esto pone de manifiesto una serie de retos tecnológicos los cuales se deben superar para ofrecer un servicio integral de calidad.

La implantación del paradigma IoT en el transporte de mercancías es una realidad hoy en día y, según [2 - 26], se espera que el mercado de gestión de flotas basados en IoT alcance casi los 17 Billones de \$ en el año 2025, de acuerdo con el informe presentado por *Grand View Research*, tal y como se refleja en la Figura 2 - 2 [2 - 26].

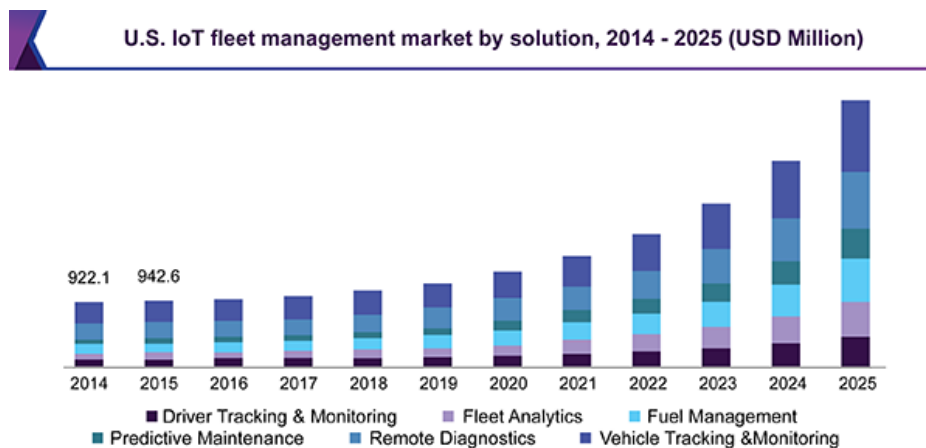


Figura 2 - 2. Gestión de Flotas sobre IoT. 2014 - 2025

Desde el punto de vista de las operaciones de almacén se puede verificar que, según [2 - 27], 7 de cada 10 actores de la cadena de suministro planean aumentar el uso de la tecnología para aplicar algoritmos que les permitan minimizar gastos a través de una gestión inteligente del inventario, una visibilidad del mismo en tiempo real, la gestión de entregas y recepciones o mantenimiento predictivo.

Por su parte, la *American Trucking Association* hace hincapié en que el 70% de todo el transporte de mercancías que se realiza en EE.UU se hace a través del uso de camiones. Esto da lugar a la aparición de diversas aplicaciones, como *geofencing* (establece límites virtuales a sobre un área geográfica y una

serie de alarmas cuando la fuente de información está fuera de esos límites), que permiten la gestión óptima de la flota a través de la monitorización de las ubicaciones de los recursos disponibles, así como la mejora en la seguridad y protección de la carga o en la toma de decisiones comerciales en tiempo real.

Por otro lado, el reciente estudio y desarrollo llevado a cabo por Inmarsat [2 - 28], ganador del premio SAFETY4SEA 2018, sitúa a la industria marítima como una de las más susceptibles de adoptar herramientas y soluciones basadas en IoT. En este estudio, que está basado en las respuestas proporcionadas por 125 armadores de todo el mundo, un gran número de compañías marítimas usan soluciones basadas en IoT por las posibilidades que éste ofrece. Entre estas capacidades se destacan el *cloud computing*, el mantenimiento predictivo, algoritmos de ayuda a la toma de decisiones, aplicaciones de seguridad.

Sin embargo, en lo que al despliegue de sistemas monitorización de contenedores inteligentes, abiertos y de bajo coste se refiere, es necesario que la tecnología dé respuesta a la serie de retos que aparecen, los cuales se listan a continuación:

1. **Tiempo real.** El concepto de información en tiempo real tiene muchas implicaciones asociadas desde el momento en el que el propio concepto “tiempo real” es relativo. La información enviada, será en tiempo real si su latencia es despreciable frente a la tasa de cambio de dicha información. La arquitectura seleccionada debe proporcionar suficientes capacidades para garantizar el cumplimiento de este requisito.
2. **Infraestructura de telecomunicaciones heterogénea.** La cadena de transporte intermodal engloba a distintos medios de transporte, así como distintos puntos de intercambio de medio en una misma ruta, lo que tiene implicaciones desde el punto de vista de la transmisión de información pues por un lado estamos entre elementos estáticos (nodos multimodales) y elementos en movimiento (medios de transporte por carretera, vías ferroviarias, fluvial o marítimo).

Por tanto, estamos ante el reto de dotar de una infraestructura de telecomunicaciones heterogénea que converja en un punto común o servidor central como medio de intercambio de información.

3. **Consumo de potencia:** Desde un punto de vista de implementación, estamos ante dispositivos que mayoritariamente se encontrarán instalados en los contenedores de mercancías y que por tanto deben dar respuesta a la problemática actual no sobrepasando unas condiciones de contorno muy estrictas. Entre estas condiciones destaca la ausencia de fuentes de alimentación por lo que el consumo del dispositivo debe ser minimizado tanto como sea posible.
4. **Hostilidad del entorno:** Desde el punto de vista electromagnético (transmisión inalámbrica de información) nos encontramos en entornos muy hostiles, pues las paredes metálicas de los contenedores provocan reflexiones y efectos negativos sobre la transmisión de información. Si bien los contenedores que son transportados en camiones o trenes cuentan con condiciones de contorno suficientemente buenas para poder transmitir información, las terminales multimodales (ferroviarias, puertos secos, puertos marítimos, etc.) organizan los contenedores en grandes baterías de los mismos, lo que hace que los nodos de transmisión se encuentren ubicados prácticamente en el interior de una *jaula de Faraday*. Por tanto será necesario seleccionar una tecnología de red que posibilite la comunicación en este marco de trabajo.
5. **Bajo coste:** Por otro lado, la mercancía que transportan los contenedores puede tener un valor muy dispar, desde muy económica hasta muy elevada, por lo que no es un activo sobre el que imputar el coste del dispositivo. Los dispositivos de sensorización se deben diseñar de forma que los costes de mantenimiento se minimicen y esto se traduce en dos líneas

claramente diferenciadas: la batería debe tener el mayor ciclo de vida posible (minimiza costes de mantenimiento, tanto en baterías como en mano de obra) y la instalación del dispositivo se debe realizar una única vez. Por tanto, debido a que el dispositivo proporciona el mismo servicio independientemente de la carga que transporte el contenedor que monitoriza, el coste de este debe ser repercutido directamente sobre el contenedor y no sobre la carga. Por esto, cada nodo debe suponer un coste despreciable frente al propio contenedor.

6. **Servicios de valor añadido:** La monitorización de contenedores de mercancías implica flujo de información desde los nodos de monitorización hacia el elemento central del sistema o *upload*. No obstante, la búsqueda de sistemas que conviertan a los contenedores en elementos activos de la cadena logística tiene otras implicaciones importantes como la capacidad de transmitir información en el sentido contrario, *download* o desde el servidor central hasta los nodos. Esto supone la posible aportación de servicios de valor añadido basados en la monitorización y actuación sobre la mercancía o los contenedores. Para ello será necesario hacer uso de las capacidades que la tecnología IoT ofrece.
7. **Extracción de la información del interior de los contenedores:** La monitorización de la mercancía suele hacerse desde el interior de los contenedores donde viaja esta. Sin embargo, la extracción de la información desde el interior del contenedor supone uno de los principales retos para la tecnología que aún se encuentra sin resolver. No obstante, a lo largo de esta Tesis Doctoral se detallan varias contribuciones originales que aportan solución a este reto tecnológico.

Los sistemas existentes en el mercado ofrecen distintas metodologías para extraer la información monitorizada en el interior del contenedor hasta el exterior para poder ser transmitida hacia el servidor o nodo central remoto. Todas estas soluciones implican, bien taladrar una pared del contenedor para poder ubicar a antena de transmisión en el exterior del contenedor, provocándole daños a este y rompiendo la estanqueidad del mismo además de suponer unos costes de mantenimiento adicionales o bien complejos sistemas que utilizan comunicación cableada canalizada a través de las juntas de estanqueidad de las puertas de los contenedores, lo que supone romper la estanqueidad del contenedor y un coste adicional de mantenimiento, además de someter al cableado a tensión mecánica que podría dañarlo, pero al menos no daña el contenedor. En lo que a investigación científica se refiere, esta situación se presenta como oportunidad para la búsqueda de una solución que evite cualquiera de estas dos situaciones.

8. **Heterogeneidad y volumen de datos:** El marco de operación de los sistemas de tracking de mercancías supone escenarios con alta concentración de dispositivos, como un barco con más de 20000 contenedores, o una terminal marítima como la de Algeciras que puede albergar más de millón y medio de contenedores. Extrapolando esta referencia demográfica a nivel mundial, estamos ante una red global de dispositivos que generan una cantidad de datos enorme. Por tanto, la arquitectura sobre la que se despliegue el servicio debe soportar todo este volumen de datos, el flujo de información y la diversidad o heterogeneidad tanto de la información como de las redes de comunicación.

Como se ha comentado anteriormente, los retos tecnológicos presentados por el sistema a desarrollar son análogos a las limitaciones que no posibilitan el despliegue masivo del paradigma IoT en la actualidad. Por tanto, la superación de estos retos supone un aporte significativo para la consecución de los objetivos de este paradigma.

2.5. Proyecto Container Unitized Tracking System (CUTS)

La mayor parte de los desarrollos realizados el proyecto CUTS se han realizado en el marco de la presente Tesis Doctoral. Estos desarrollos son los centrados en todo el diseño de la plataforma a instalar en los contenedores, tanto a nivel hardware como firmware, planificación del despliegue de red y el diseño conceptual de la arquitectura de la plataforma de servicios. Todos estos desarrollos serán detallados en los siguientes puntos para lo que, inicialmente se detalla un breve estado del arte que sitúa al lector en el estado de la técnica hasta el desarrollo del sistema que en este epígrafe se presenta.

Adicionalmente, cabe destacar, que el proyecto CUTS completo cuenta con desarrollos adicionales, complementarios a los aquí detallados, orientados principalmente al desarrollo de las redes de comunicación, la explotación de la información provista por los TUs⁶ y al desarrollo de servicios de valor añadido para los usuarios externos que son desarrollados por otros socios el proyecto. Si bien esta última parte es la que se ocupa de las capas más altas de aplicaciones sobre arquitectura IoT, los desarrollos acometidos en esta tesis proporcionan la tecnología y arquitectura necesaria para que esas aplicaciones se construyan sobre un entorno HW y SW suficientemente consistente.

A continuación se muestra un esquema general (Figura 2 - 3) del alcance y arquitectura del proyecto CUTS en su totalidad, lo cual ayudará al lector a situarse en dicha arquitectura.

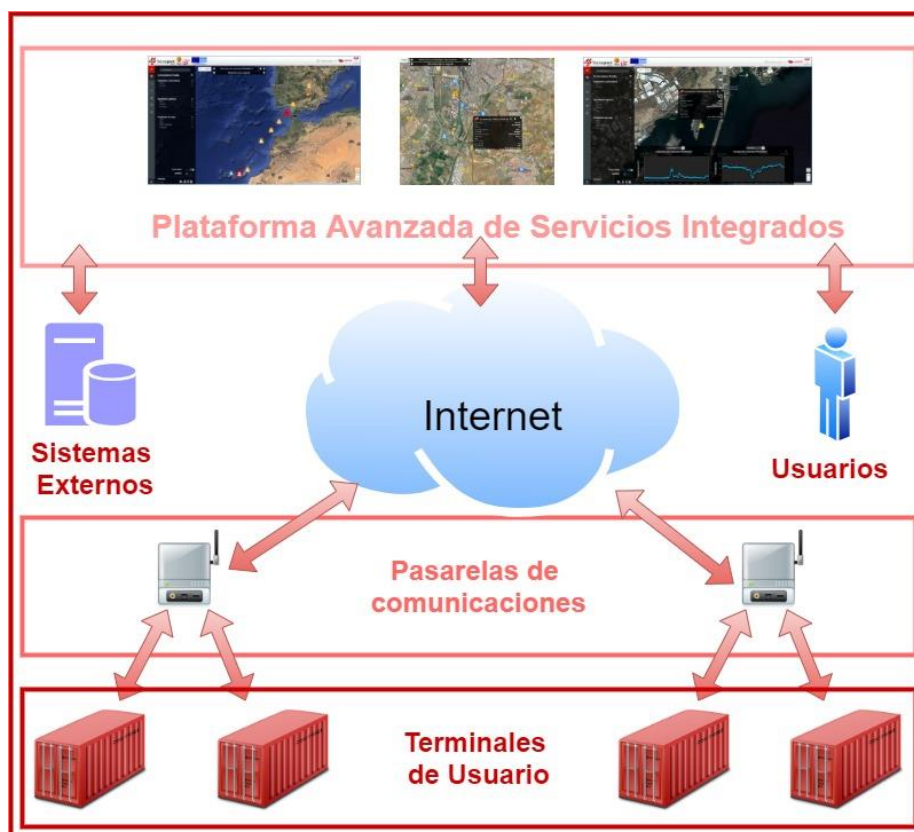


Figura 2 - 3. Arquitectura CUTS

Se puede apreciar como el sistema cuenta con una Plataforma de Adquisición de Datos que toma información de los contenedores y su interior, además de actuar sobre ellos, una red de

⁶ TU - Terminal de Usuario

comunicaciones local que conecta con Internet a través de una pasarela, una Plataforma Avanzada de Integración de Servicios (PAIS) que proporciona los recursos necesarios para almacenar la información y procesarla así como interfaces abiertas para la integración de terceros y una serie de desarrollos web que ofrecen sus servicios a los usuarios del sistema.

2.5.1. Estado del Arte de sistemas de monitorización de contenedores de mercancías

El desarrollo de sistemas de tracking de mercancías y otros más complejos que contemplan características de seguridad, es algo que viene desarrollándose desde hace más de una década [2 - 29]. Ya en 2005, en [2 - 30] recogían el concepto de monitorización orientada a la seguridad y, además de monitorizar las variables más comunes (temperatura, humedad, etc.), se monitorizaban otras como el estado de las puertas del contenedor, la luminosidad (posibles sabotajes), se utilizaban sensores infrarrojos para detectar presencia humana, etc. Posteriormente utilizaban las medidas tomadas sobre una serie de algoritmos destinados a detectar la presencia de un ataque al contenedor en cuestión. No obstante, aun tratándose del inicio de una tendencia, este sistema no llegó al mercado, quedando en el estado del arte como publicación de referencia.

No obstante, hasta 2010, la mayoría de los sistemas de tracking de contenedores se basan en tecnologías como RFID o el reconocimiento óptico de matrículas OCR [2 - 33].

A partir de este momento se comenzaron a comercializar algunos sistemas de este tipo bajo premisas como “bajo coste y alcance global”, cubriendo servicios antirrobo, detección de armas o contrabando. Esto se recoge bajo el concepto *Container Security Device* (CSD) (Figura 2 - 4 [2 - 31]). Un ejemplo de ello es el sistema comercializado como *CommerceGuard* [2 - 32] que ofrece servicios de detección de intrusión y antirrobo. Otro ejemplo de sistema de tracking y gestión de la carga podemos encontrarlo en [2 - 33] cuyo diseño estaba soportado por la experiencia de los propios conductores y cuyo alcance estaba centrado en el diseño y desarrollo de sistemas software que posibilitaran conocer y procesar las rutas de transporte habituales ofreciendo a los eslabones de la cadena logística información en tiempo real de forma que éstos pudieran anticiparse a puntuales retrasos (o adelantos) o incidencias que pudieran ocurrir durante el transporte de la mercancía. Sin embargo, a nivel de red, trabaja a la frecuencia de 2.4 GHz, lo cual no es lo más eficiente tratándose de un entorno muy hostil en lo que a transmisión radio se refiere



Figura 2 - 4. *Container Security Device* (CSD)

No obstante, la investigación y desarrollo en otras tecnologías continúa y es en el marco del Programa FP7 donde se lleva a cabo el proyecto *Smart Container Management* (Smart-CM) ([2 - 34]) ya que aparecen como socios principales compañías de la relevancia de Globaltrack o Raytheon. El objetivo principal era añadir más capacidades de sensorización, además de la geolocalización, a los dispositivos de monitorización. El demostrador consistió en la instalación de los dispositivos en 24 contenedores durante las anualidades de 2010 y 2011 y la monitorización de hasta 42 trayectos marítimos entre Asia y Europa, siempre en un marco logístico intermodal.

En este sentido han aparecido otros productos posteriores como el Globe Tracker [2 - 35], que incluye una serie de medidas adicionales como la temperatura externa y la transmisión inalámbrica a través de una interfaz WiFi, lo cual aunque dota de comunicación al dispositivo, supone un consumo de energía muy elevado lo que, sumado a que es necesario taladrar el contenedor, lo convierte en una solución poco viable. Otro dispositivo similar es el Tritón 0 que, similar al Globe Tracker, sustituye la interfaz WiFi por una conexión de red móvil y servicio de Geofencing.

Estos y otros dispositivos conforman un catálogo de mercado amplio y variado, aunque la mayoría de ellos ofrecen prestaciones similares centradas principalmente en el tracking (GPS, que supone un alto consumo de energía) y la transmisión por red móvil o satélite, lo que implica tener una tarjeta SIM por dispositivo, algo que aumenta significativamente el coste de explotación de estos sistemas (a fecha de desarrollo de este sistema no estaban disponibles tecnologías como NBIoT o Sifox). La monitorización de variables como la temperatura, luminosidad o humedad relativa son cada vez más comunes.

Lo comentado en los párrafos anteriores pone de manifiesto el interés y la necesidad de desarrollar dispositivos con capacidad de ofrecer el catálogo completo de servicios deseados. Es por este motivo que, en el marco del proyecto Tecnoport2025, se opta por el desarrollo de un sistema de monitorización de contenedores capaz de solventar los retos que la tecnología y el paradigma IoT presentan y que han sido anteriormente detallados.

2.5.2. Alcance del sistema CUTS

A continuación se listan, desde un punto de vista conceptual, las necesidades a cubrir por el nuevo sistema a desarrollar:

- Realizar el seguimiento de contenedores durante sus trayectos en cada modo de transporte, tanto de su ubicación como del estado de la carga y eventos de apertura/cierre de puertas, habilitando a los distintos *stakeholders* a gestionar la flota de contenedores de su propiedad.
- Servicio de actuación sobre los contenedores. Debido a lo amplio de la casuística de posibles actuaciones, el sistema ofrecerá unas actuaciones genéricas que posteriormente deberían ser adaptadas a las actuaciones deseadas en cada caso mediante un dispositivo adicional.
- Detección de apertura/cierre de puertas y medida de la luminosidad, permitiéndose la emisión de alarmas para su seguimiento, lo cual reduce el riesgo de pérdida de mercancía y aumenta la seguridad general en el transporte.
- Integrabilidad de dispositivos sensores y actuadores por parte de terceros a través de una interfaz abierta.
- Potencialidad para la integración de datos procedentes de sistemas de otros actores externos, y así ampliar y consolidar la información suministrada por cada contenedor en cada momento en cada medio de transporte (Barco, Tren, Camión) como es el Origen, Destino, Fecha/Hora Estimada/Real de Salida y Fecha/Hora Estimada/Real de Llegada.

Desde un punto de vista global, el sistema de integración adquirirá datos heterogéneos, tales como temperaturas, estado de puertas, detección de personas, tiempos de llegada, salida, cargador, etc. Toda esa información ha de ser integrada en las capas más altas de la arquitectura IoT.

Hoy día, una de las plataformas más interesantes para los niveles superiores de la arquitectura IoT y que más fuertemente ha apostado por su despliegue a nivel global es FIWARE.

FIWARE es una plataforma impulsada por la Unión Europea, dentro del VII Programa MARCO, que desde 2012 está siendo desarrollada por un consorcio de empresas entre las que se encuentra Telefónica, *partner* del proyecto Tecnoport2025. Nace con el propósito de ser una plataforma basada en una arquitectura abierta y pública sobre la que las empresas del sector puedan desarrollar sus

aplicaciones y compartir información, basada en una arquitectura estandarizada, la cual se muestra a continuación y totalmente compatible con la filosofía IoT.

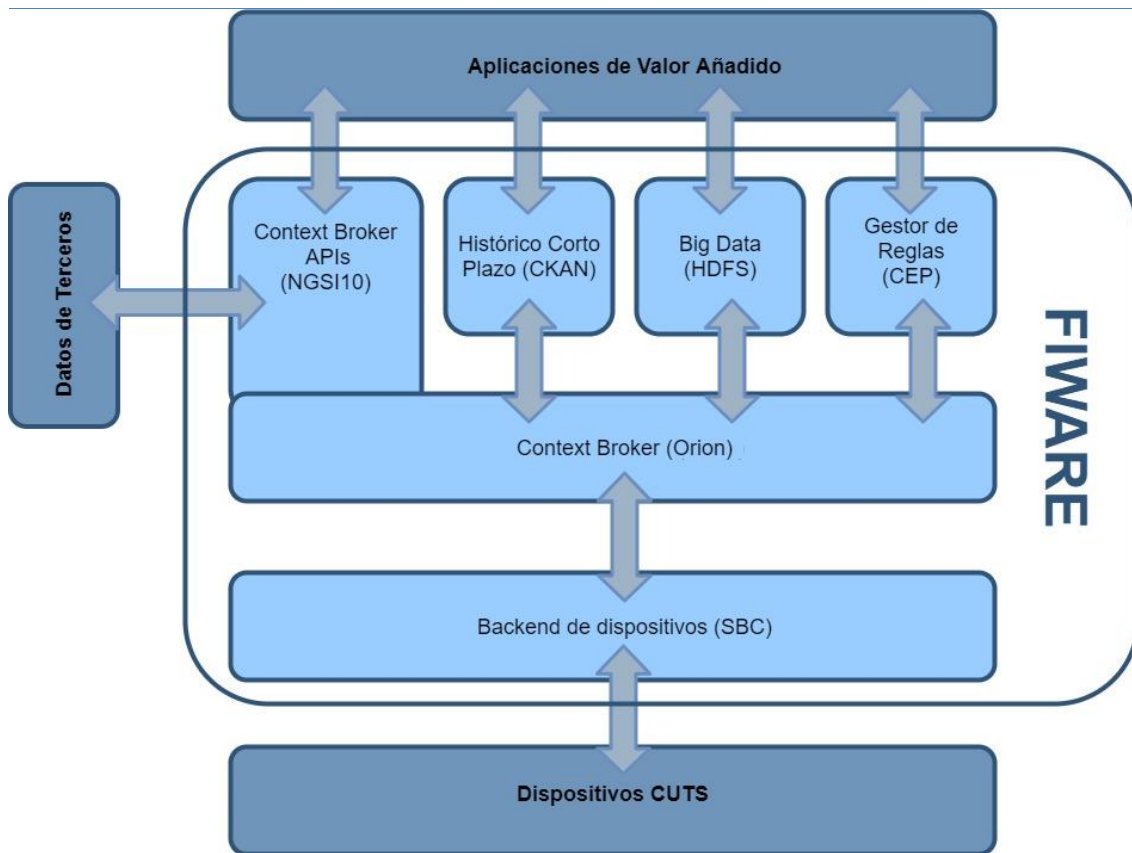


Figura 2 - 5. Plataforma Avanzada de Integración de Servicios

Desde el punto de vista de CUTS, FIWARE se convierte en el punto de integración de información desde el que ofrecer las interfaces necesarias a terceros para estos puedan desarrollar sus propias aplicaciones y ofrecer nuevos servicios de valor añadido. Esto supone una innovación evidente a la vez que un cambio de perspectiva en el que la potencialidad de los servicios ofrecidos no está únicamente en la aplicación que los ofrece sino en la arquitectura común sobre la que se ofrecen interfaces abiertas para el desarrollo de tantas aplicaciones como se deseen.

2.5.3. Definición del Sistema CUTS

En este punto se define lo que denominamos sistema CUTS y que está compuesto por una serie de módulos o bloques funcionales que abarcan desde la adquisición de medidas o actuadores, el procesamiento de la información, la transmisión, el alojamiento y el ofrecimiento a terceros.

Cabe destacar que en el alcance del sistema CUTS también se incluyen aplicaciones de alto nivel que ofrecen los servicios y las interfaces necesarias a los usuarios finales. No obstante, como ya se ha comentado, se trata de desarrollos de terceros, que forman parte del Consorcio del proyecto, y no se incluye en la misma.

Como se puede apreciar en la Figura 2 - 3 el sistema está conformado por elementos funcionales claramente diferenciados.

Por un lado, en el nivel más bajo, se encuentra la Plataforma de Adquisición de Datos (PAD), encargada de monitorizar las variables necesarias del interior, así como de realizar las actuaciones comandadas desde los niveles más altos. Se comunicará directamente con el TCI (Terminal de Comunicaciones Inalámbrico) ubicado en el exterior del contenedor. Ambos dispositivos conforman el TU.

La información recibida o generada por la Plataforma de Adquisición de Datos es transmitida por el TCI a través de la red de comunicaciones heterogénea, la cual basada en una serie de pasarelas integran la información que se transmite por cada una de ellas. Estas pasarelas son el medio para alcanzar la Plataforma Avanzada de Integración de Servicios (PAIS), la cual, basada en FIWARE, ofrece las interfaces necesarias para que los servicios de terceros puedan ser desarrollados aprovechando la infraestructura anteriormente comentada de forma global y abierta.

En los siguientes puntos se detalla el alcance de cada uno de los bloques funcionales que conforman el sistema CUTS para, posteriormente, acometer su desarrollo.

2.5.3.1. Terminal de Usuario

La Plataforma de Adquisición de Datos es el módulo de más bajo nivel, más cercano a los contenedores y es la encargada proporcionar las interfaces para monitorizar los datos de los contenedores al mismo tiempo que ejecuta las actuaciones comandadas remotamente.

La PAD, físicamente, se compone del bloque instalado en el interior del contenedor y será parte de un conjunto mayor, el TU, el cual estará compuesto por el propio PAD y el TCI, ubicado en exterior del contenedor. Será el TCI el encargado de establecer comunicación inalámbrica entre el exterior del contenedor y la PAIS.

Como todos los bloques que componen CUTS, su definición vendrá dada por una serie de requisitos clasificados en dos tipos: funcionales y técnicos. Los primeros definen el módulo desde un punto de vista de funcionalidad global o de alto nivel, mientras que los técnicos son más precisos y concretos. A continuación se detallan ambos.

2.5.3.1.1. Especificaciones Funcionales

Variables a sensar

Como no puede ser de otra forma, uno de los requisitos fundamentales para un terminal destinado a medir y actuar sobre los contenedores de mercancías es la naturaleza de las variables a adquirir.

Las variables objetivo en este proyecto son, principalmente, ambientales. El enfoque para la adquisición de señales del exterior estará compuesto de bloques separados e independientes para cada señal, divididas por naturaleza de la misma. No obstante, el sistema estará diseñado de forma que, si fuera necesario en el futuro, pudieran añadirse nuevos sensores, bien porque las necesidades sean otras o porque aparezcan más o mejores sensores en el catálogo de mercado. Para ello el sistema debe contar con una interfaz abierta que posibilite la escalabilidad del mismo de forma “ilimitada” en cuanto a número y tipología de sensores.

Capacidad de Actuación

La PAD no solo tendrá capacidad de adquisición de datos, sino también, de actuar, controlado remotamente desde la PAIS, sobre el entorno donde se encuentra ubicado o sobre el propio contenedor. Para poder llevar a cabo estas actuaciones será condición necesaria implementar el circuito de adaptación electrónico correspondiente, ya que no es posible definir o agrupar toda la casuística en varios casos de uso.

Para ello se desarrollan varias alternativas que cubren la mayoría de los casos de uso. Por un lado, la más simple se basa en el control de un pin de propósito general de la PAD desde la PAIS que actúe

como disparador o *trigger* del circuito de adaptación correspondiente y realice la actuación deseada como, por ejemplo, la activación del motor de un contenedor refrigerado, o la activación de una alarma tras detectar presencia humana o luminosidad en el interior de un contenedor que tiene sus puertas cerradas.

Por otro lado, existe la posibilidad de conectar la PAIS con el circuito de adaptación a través de un protocolo abierto entre dos periféricos UART (serie) y controlar esta actuación en base a una codificación preestablecida. Esto posibilitaría, con el desarrollo de la adaptación pertinente, el control de cualquier tipo de actuación por compleja que sea y dotará al sistema de la versatilidad necesaria.

Minimización de costes

El desarrollo de un sistema de bajo coste, tanto a nivel de desarrollo como a nivel de explotación (costes de mantenimiento) es uno de los requisitos fundamentales para posibilitar el despliegue masivo de dispositivos.

Para conseguirlo, se optará por una arquitectura HW simple a la vez que efectiva, basada en elementos electrónicos de bajo coste y que cuenten con el menor consumo de energía posible.

Por otro lado, será necesario minimizar los costes de explotación los cuales se centralizan principalmente, en los sistemas existentes hasta el momento, en el coste del sistema de comunicación inalámbrico que, frecuentemente, utiliza una tarjeta SIM por dispositivo. Será objeto del desarrollo la eliminación de esta tarjeta SIM. Para ello se optará por el despliegue de redes locales, tanto en ubicaciones fijas (terminales portuarias y almacenes) como en medios de transporte de forma que se necesite una única tarjeta SIM por red y sea esta misma la que dé servicio a todos los dispositivos en su rango de cobertura. Como se ha comentado anteriormente, la evolución de las tecnologías de comunicación, han dado lugar, recientemente, a la aparición de nuevas redes como NBIoT o Sifox, que ya ofrecen solución a este problema, pero que a fecha del desarrollo de este sistema no lo hacían. No obstante, la arquitectura de sistema planteada permite la integración de estas nuevas tecnologías con el desarrollo realizado.

Consumo de energía

Uno de los requisitos principales de un sistema de monitorización/actuación de mercancías o contenedores es maximizar el tiempo de vida autónomo o autonomía del mismo con el fin de minimizar costes de mantenimiento y por tanto facilitar la incorporación del producto al mercado.

En un caso de mínimos, la autonomía del sistema podría estar fijada en el tiempo de duración de un trayecto y que la batería fuera recargada/intercambiada antes del siguiente trayecto, en el caso del corredor Madrid – Sevilla – Canarias necesitarían una autonomía en torno a los 15 días. Sin embargo, esto haría inviable el despliegue de la tecnología por los altos costes de mantenimiento que supondrían, los cuales llegarían a ser muy superiores al coste del propio dispositivo. Por otro lado, estaríamos ante la hipótesis errónea que supone que los contenedores que viajan de Madrid a Canarias son los mismos que vuelven, lo cual es prácticamente imposible o, al menos, muy poco probable. En el caso opuesto, lo ideal sería que la autonomía del dispositivo fuera igual o superior al tiempo de vida operativa del contenedor donde se instala y de esta forma, al no necesitar tareas de mantenimiento, el coste del dispositivo no sería significativo.

Con el objeto de minimizar el consumo de potencia será clave hacer una buena gestión de los dispositivos sensores y actuadores, habilitándolos y deshabilitándolos así como seleccionando una tecnología de comunicación inalámbrica enfocada a este tipo de sistemas.

Por tanto, los requisitos en materia de consumo de potencia están orientados a maximizar el tiempo de vida de la batería superando significativamente el tiempo de trayecto y tendiendo a alcanzar la vida útil de un contenedor. El objetivo es una autonomía de varios años.

Capacidad computacional

Este punto se establece como uno de los requisitos más importantes del sistema. Es necesario dotar de inteligencia a las PAD con el fin de tener capacidad de tomar las medidas de los sensores, procesarlas en caso de que sea necesario y transmitir las hacia los TCIs que serán los encargados de hacerlas llegar a la PAIS.

Por otro lado, en lo que la capacidad computacional afecta al consumo de energía, es necesario seleccionar un microcontrolador que cuente con un buen rendimiento en lo que a consumo (W) por velocidad de procesado (MHz) se refiere, de forma que podamos contar con una capacidad computacional suficiente sin aumentar significativamente el consumo de potencia. Para ello será fundamental que el microcontrolador seleccionado cuente con modos de bajo y ultra bajo consumo, aplicables durante los tiempos muertos en los que no se está midiendo ninguna variable o actuando sobre el entorno.

Además, como se trata de una serie de dispositivos que durante los periodos de tiempo de reposo entrarán en modos de bajo consumo será necesario dotar al mismo de un reloj en tiempo real o RTC que “despierte” al TU en los momentos en los que necesite conectarse al canal de comunicaciones o tomar las medidas necesarias. Del mismo modo este elemento será fundamental para la trazabilidad de las acciones realizadas (toma de medidas o actuaciones) y ubicarlas temporalmente.

Conectividad

Por un lado será necesario contar en los TUs con las interfaces necesarias para conectar, tanto los sensores de los que se va a medir, como los actuadores que se van a controlar. Esto engloba interfaces como SPI, I²C, UART, ADCs, DACs, etc. Por otro lado será necesario contar con un punto de conexión entre el TCI, en el exterior del contenedor, y la PAD en el interior del contenedor. Esta interfaz será utilizada para la transmisión de la información recogida por los sensores y la destinada a los actuadores proveniente de la PAIS. Esta comunicación se implementará sobre una interfaz serie UART.

Como en cualquier sistema embebido será necesaria una interfaz de programación del microcontrolador del tipo JTAG, al mismo tiempo que será necesaria una interfaz de *debug* serie UART. Esta última interfaz será de especial utilidad para conocer el estado de la plataforma en cualquier momento y sin necesidad de acceder a los registros del microprocesador.

Además, será necesario dotar al sistema de un dispositivo WatchDog a través de interfaz IIC que garantice la estabilidad del TU y por tanto se eviten situaciones de bloqueo funcional.

Almacenamiento de información

El tipo de redes utilizadas para la monitorización en bajo consumo, tales como IEEE802.15.4, no disponen continuamente del canal de transmisión con el objetivo de reducir el consumo de potencia. Por ello, los datos, una vez tomados de los sensores, deben ser almacenados (y posiblemente procesados) localmente antes de ser transmitidos hacia la PAIS. Otro caso de uso que refleja la necesidad de definir este requisito reside en la posibilidad de que el TU pierda la cobertura de red y no tenga posibilidad de enviar datos durante un periodo de tiempo o que el TU agote su batería. Se debe garantizar que la información se almacenará en memoria de tipo no volátil y la información se transmitirá una vez el nodo recobre la cobertura o se le sustituya la batería.

En caso de que el TU agotara su batería por completo o no recuperara la cobertura la información será descargable mediante una comunicación serie con un PC.

2.5.3.1.2. Especificaciones Técnicas

En base a los requisitos funcionales detallados anteriormente, es necesario definir una serie de requisitos técnicos que aseguren el cumplimiento de las funcionalidades especificadas. A continuación se detallan dichos requisitos.

Sensado

Como es de esperar la mayoría de ellas son magnitudes relacionadas con el entorno del contenedor y otras tienen que ver directamente con las condiciones del propio contenedor:

- Temperatura y humedad relativa. La medida de la temperatura y la humedad relativa en el interior del contenedor ofrecerá una idea de las condiciones ambientales en las que viaja la mercancía del contenedor monitorizado.
- GPS. Como cualquier sistema de tracking es necesario recibir la posición GPS de los contenedores. Este dispositivo merece un trato particular debido al gran consumo de potencia que supone, de forma que la instalación de estos sensores no se realizará por contenedor sino por concentrador de comunicaciones. De esta forma se asume que, si se conoce la posición del concentrador ubicado, por ejemplo en un barco, se conoce la posición de todos sus contenedores y de la misma forma para transporte ferroviario o terminales portuarias.
- Golpes. Este tipo de sensores son muy útiles de cara a garantizar la seguridad de la mercancía en el trayecto detectando golpes o caídas que pueden sufrir los contenedores como fruto de una manipulación deficiente o como intento de sabotaje del mismo. Esta detección se realizará basada en acelerómetros MEMS.
- Sensor Magnético. Esta medida monitorizará en todo momento el estado de las puertas del contenedor indicando si estas se encuentran abiertas o cerradas. Este será otro factor importante de cara a los servicios de seguridad y custodia de la mercancía.
- Luminosidad. La medida de esta magnitud por sí sola no ofrece información muy relevante pero, si se combina con otros sensores, puede resultar muy útil de cara a ofrecer servicios de seguridad. La combinación de la medida del sensor magnético (puertas cerradas) y el de luminosidad (elevada) darían información de que se ha podido producir una intrusión en el contenedor por algún punto distinto a las puertas.
- Movimiento. La utilización de este tipo de sensores tiene como finalidad ofrecer servicios adicionales en lo que a seguridad y contrabando de seres vivos se refiere, detectando movimiento de cuerpos calientes en el interior de los contenedores a través de sensores infrarrojos o PIR.
- Como se ha comentado en puntos anteriores, será necesario implementar un protocolo serie abierto para la conexión de cualquier sensor de mercado con la adaptación necesaria. Esto supone contar con un sistema de monitorización/actuación escalable y actualizable en todo momento.

Actuación

Tal y como se ha comentado en los requisitos funcionales, es necesario contemplar la actuación sobre el contenedor o su entorno por dos vías diferentes:

- Actuación a través de GPIO: Esta actuación consistirá en la activación ('1' lógico) o desactivación ('0' lógico) de uno o varios GPIOs. En todo caso la adaptación de esta señal al sistema de actuación se estimará parte del propio actuador. Desde un punto de vista funcional, esto permite que cualquier fabricante que conozca la API de conexión pueda desarrollar una adaptación e integrar sus propios actuadores en las PAD.
- Actuación por UART. Se trata de una implementación análoga a la anterior, aunque en este caso la adaptación necesita de un microprocesador o dispositivo capaz de comunicarse por

puerto serie con la PAD. Esta funcionalidad permite a un tercero comunicarse desde la PAIS con su sistema de actuación sin más limitación que la de la tecnología de transmisión (la información a transmitir inalámbricamente no puede ser ilimitada por cuestiones de consumo de potencia).

Alimentación

La autonomía de los TUs, junto con las prestaciones ofrecidas, determina en gran medida el éxito de estos dispositivos. Por este motivo es necesario poner mucho énfasis en minimizar tanto como sea posible el consumo de potencia.

Con el fin de minimizar el consumo se utilizarán baterías y dispositivos con alimentación de 3.6V evitando los consumos estáticos de reguladores de tensión implementado para ello, si fuera necesario, circuitos de control que los habiliten/deshabiliten las distintas alimentaciones.

En caso de necesitar alimentar dispositivos sensores o actuadores que cuenten con un consumo significativo será necesario añadir una fuente de alimentación adicional y se considerará esta como parte del propio sensor/actuador.

La mayoría de los sensores disponibles en el mercado electrónico para las magnitudes o variables anteriormente mencionadas, son de baja tensión de alimentación (1.8V a 3.3V) y bajo consumo. En caso de contar con sensores alimentados a 1.8V o alguna tensión diferente a los 3.3-3.6V nominales de la batería, dicha tensión será conseguida con reguladores de bajo consumo.

La tecnología de baterías seleccionada será aquella que, además de tener en cuenta su precio, maximice la autonomía. En este sentido las baterías no recargables, tales como las de litio primario, ofrecen más prestaciones que las recargables.

Mecánicas

Por norma general, este tipo de sistemas se enfrentan a ubicaciones expuestas a la intemperie, por un lado, y al manejo *poco delicado* por parte de los operarios, por otro lado. Esto supone que los dispositivos están sometidos a un fuerte estrés térmico, desde temperaturas bajo cero a temperaturas muy elevadas como 55° en las exposiciones al sol de verano en Andalucía. Por otro lado, la maquinaria con la que son transportados los contenedores, especialmente en su estancia en las terminales portuarias, es poco cuidadosa, en tanto que intentan maximizar el número de contenedores (des)cargados en un periodo de tiempo y por tanto los golpes entre contenedores son muy frecuentes. Estos golpes pueden recaer directa o indirectamente sobre los nodos o TUs, de manera que deben estar provistos de una envolvente y los elementos necesarios para absorber este tipo de golpes.

Por otro lado, los TUs deben ser instalados en los contenedores, lo que plantea varios problemas o retos tecnológicos.

Por un lado, los contenedores cuentan con una estructura no definida y particular según cada fabricante, incluso a veces con variaciones en contenedores del mismo fabricante. Esto supone que el diseño o la selección de la envolvente de los dispositivos debe ser ajena a las especificaciones de un modelo de contenedor concreto. No obstante la inmensa mayoría de contenedores pueden ser agrupados en 2 tipos: los de paredes lisas como los refrigerados y los contenedores con paredes corrugadas.

Por otro lado, es necesario definir cómo fijar los dispositivos a los contenedores. Para ello es fundamental que la metodología utilizada no sea ni permanente (por si es necesario realizar tareas de mantenimiento) ni invasiva (perforaciones) para evitar dañar los contenedores además de sumar costes de instalación y mantenimiento. Por ello, como requisito se fija la utilización de fijaciones magnéticas de alto rendimiento, como el neodimio, que posibilita la fijación fiable de los dispositivos a los contenedores permitiendo procesos de instalación y eliminación muy sencillos y rápidos

evitando el uso de herramientas. Existen en mercado numerosas soluciones magnéticas basadas en neodimio por lo que no supondrá un coste significativo añadido.

Otro de los desafíos que añaden requisitos mecánicos al sistema CUTS es la conectividad entre la PAD, en el interior del contenedor, y el TCI en el exterior del contenedor. Para ello se utilizará, una conexión cableada aprovechando las juntas, a menudo plásticas, existentes en el perímetro de las puertas de los contenedores. No obstante, será necesario optar por un cable plano a la vez que suficientemente robusto al que hay que dotar de conectores, también suficientemente robustos, de fácil instalación.

Esto, unido a las fijaciones magnéticas, posibilitan la movilidad de los TUs de forma que el binomio TU-Contenedor no es insoluble si no que un TU instalado en un contenedor que no realiza trayectos en un periodo de tiempo puede ser quitado e instalado muy fácilmente en un nuevo contenedor, lo que supone la reutilización del mismo y la consiguiente reducción de costes de producción.

Protección

Como ya se ha comentado, los dispositivos se enfrentan a entornos de trabajo muy hostiles desde varios puntos de vista: mecánicos, electromagnéticos, ambientales, etc.

La propia naturaleza del uso de los TU supone su operación en una gama de entornos muy variados como puede ser desde el norte Europa, a por ríos, el océano o el sur de África. Es por esto por lo que se definen una serie de requisitos que garanticen el correcto funcionamiento de los TUs en todos estos entornos:

- Temperatura: Será necesario que la electrónica seleccionada y desarrollada sea capaz de operar en un rango de temperaturas de -15° a 75°.
- Humedad relativa: Debido a que los dispositivos transitarán por zonas muy dispares en este sentido, será necesario que soporten grados de humedad relativa del 0% hasta por encima del 90% alcanzable en las travesías marítimas. Esto implica la necesidad de envoltentes que cumplan con grado de protección IP57 o superior en lo que a líquidos se refiere, para la parte de la electrónica que lo requiera.
- Salinidad: Uno de los principales retos que plantea la utilización de electrónica en entornos marítimos es la salinidad existente (puede alcanzar más del 5%) que, unida a los altos niveles de humedad relativa, suponen una mezcla muy hostil para los dispositivos electrónicos, así como para los elementos metálicos como pueden ser las envoltentes. Por este motivo, se procurará la selección de envoltentes basadas en polímeros en lugar de metales capaces de garantizar el grado IP anteriormente comentado para minimizar el efecto de la corrosión y sulfatación

2.5.3.1.3. Descripción funcional

En base a lo definido en los requisitos funcionales y las especificaciones técnicas se muestra un diagrama de bloque de las Plataformas de Adquisición de Datos primeramente y del TU completo después.

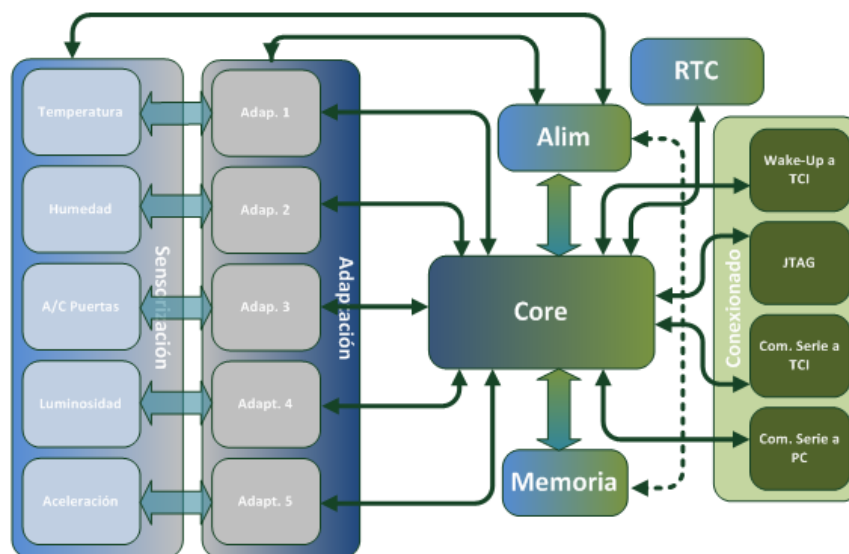


Figura 2 - 6. Diagrama Funcional PAD

Si se analizan las interfaces entre los distintos bloques funcionales se puede apreciar como todas tienen como origen/destino uno de los bloques funcionales y como destino/origen el Core (a excepción de los bloques funcionales de sensorización que se conectan al Core a través de los bloques funcionales de adaptación, cuando son necesarios) de forma que éste es el que tiene el control de toda la Plataforma de adquisición, desde el acceso a la Memoria de datos hasta a las interfaces de conexión o las etapas de adaptación que conectan el Core con los sensores.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del TU completo, compuesto por la Plataforma de Adquisición de Datos, en el interior del contenedor, y el Terminal de Comunicaciones Inalámbricas, en el exterior del mismo.

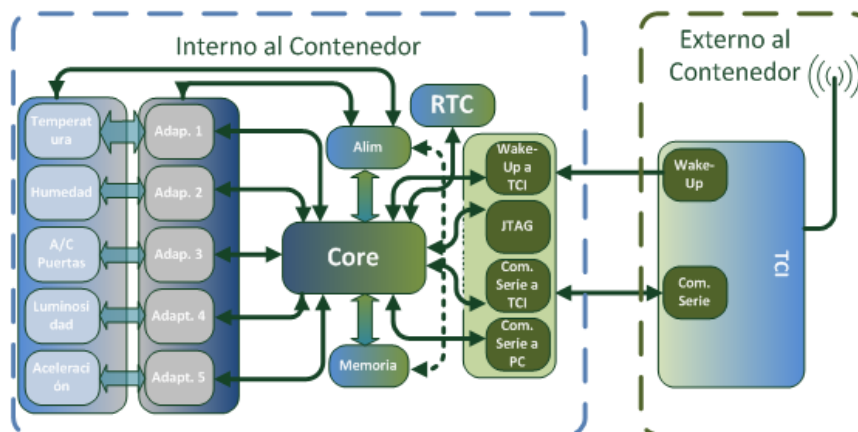


Figura 2 - 7. Bloques funcionales TU (PAD + TCI)

2.5.3.2. Red de comunicaciones

La red de comunicaciones desplegada para el proyecto CUTS está compuesta por varias tecnologías conformando una red heterogénea que proporciona y garantiza el servicio en cualquier ubicación en la que se encuentren los dispositivos, dentro de la casuística esperada.

Se trata de una red pública abierta y colaborativa conformada por dos redes distintas:

- Una red de comunicaciones local de bajo consumo y largo alcance, así como baja tasa de datos que dotará de conexión a los TCIs instalados en los contenedores a lo largo de toda la cadena intermodal. Estas redes locales estarán desplegadas tanto en los medios de transporte (camiones, trenes y barcos), así como en las terminales portuarias por las que se espera que pasen los contenedores (en el marco de TECNOPORT2025: Sevilla, Tenerife y Las Palmas). Esta red es suministrada por la empresa Adevice Solutions S.L.
- Una red de altas prestaciones encargada de transmitir toda la información generada por los contenedores hasta la Plataforma Avanzada de Integración de Servicios. La interconexión entre ambas redes se llevará a cabo por unas Pasarelas o *Gateways* (GW) desplegadas junto con las redes locales. El paquete de servicios de la red de altas prestaciones es suministrado por Telefónica.

2.5.3.2.1. Diseño y Alcance de la Red local IEEE 802.15.4

La tecnología seleccionada para las redes locales de bajo consumo y baja tasa de datos es la especificada en la norma IEEE 802.15.4, por ser la que mejor se adapta a las necesidades del sistema a desarrollar, a fecha de ejecución de este desarrollo. Como se ha comentado, hoy día se podría optar por redes alternativas como NB-IoT o Sigfox, para aquellos lugares donde la cobertura fuese suficientemente buena, aunque en los puntos donde no hubiese cobertura habría que seguir optando por el esquema de red propuesto: red local más red troncal de transporte. No obstante, en el momento de ejecución del proyecto las tecnologías comentadas apenas se encontraban en fase de definición y no eran ofrecidas por ningún operador.

La red local, basada en la tecnología IEEE 802.15.4 estará compuesta por varios tipos de dispositivos en despliegue. Estos serán los TCIs instalados en los contenedores, los Routers que aumentarán el rango de cobertura y los Concentradores de red, que son los encargados de gestionar la red y realizar las labores de Gateway entre la red local y la red de transporte hacia/desde la PAIS.

2.5.3.2.2. Red de transporte

De la misma forma que la red local se contrata a un tercero, la solución de red de transporte es subcontratada a otro especialista en desarrollos y servicios de las tecnologías deseadas como Telefónica. Por otro lado, la contratación al mismo proveedor que suministra la tecnología para la PAIS, como es FIWARE, garantiza la integración entre todas las tecnologías.

Las redes de transporte con las que se cuenta en CUTS son las siguientes, todas ellas ofrecen ancho de banda suficiente para el servicio que se ofrece:

- Red GPRS/3G/4G: Red móvil con amplia cobertura destinada a la conexión de concentradores instalados medios de transporte por carretera o ferroviario. Se asegura la cobertura en todo el trayecto sobre estos medios de transporte.
- Red Satelital: Red destinada a dar cobertura a los concentradores de red en el caso de no existir cobertura de ninguna de las redes anteriormente comentadas, como es el caso de las travesías marítimas.

2.5.4. Arquitectura HW

Ya se ha comentado anteriormente el concepto de PAD, TCI y TU, no obstante, a continuación, se muestra un diagrama aclaratorio en el que se diferencia cada una de las partes, subdividiendo alguna de ellas.

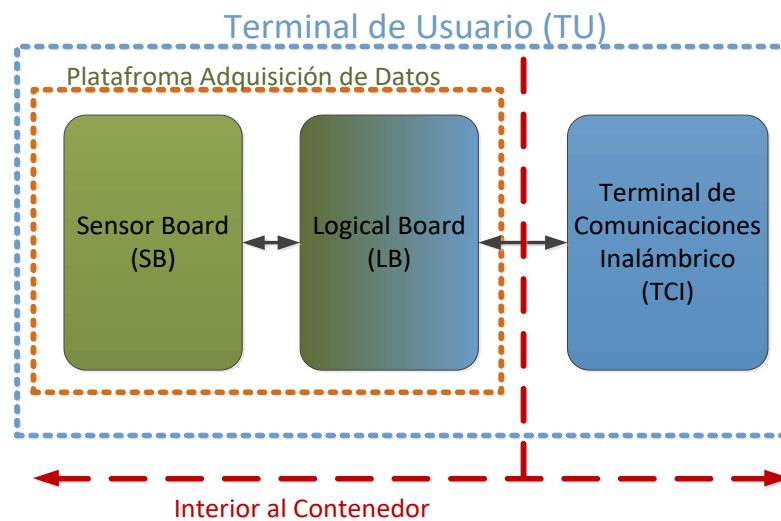


Figura 2 - 8. Arquitectura HW

Según se desprende de la Figura 2 - 8, el Terminal de Usuario o TU estará compuesto por el TCI, la Logic Board o LB (se detalla más adelante) y la Sensor Board (SB).

Desde otro punto de vista, tal y como ya se ha comentado a lo largo de esta Tesis, la Plataforma de Adquisición de Datos está compuesta por la parte interna a los contenedores, o lo que es lo mismo la propia LB y los sensores/actuadores con sus adaptaciones (SB).

Desde el punto de vista HW, cada Nodo CUTS estará compuesto por, al menos 3 placas:

- **Terminal de Comunicaciones Inalámbricas o TCI:** Placa o tarjeta de comunicación inalámbrica IEEE 802.15.4, adquirida de un tercero con capacidad de comunicación con la LB para la comunicación de los datos a transmitir o provenientes de la PAIS.
- **Logic Board:** se trata de la placa principal de los dispositivos en tanto que es la que aloja el microcontrolador (*Core*) que controlará el resto del dispositivo así como las comunicaciones, tanto con la SB como con el TCI. La LB es una solución HW provista por ADEVICE Solucions S.L.
- **Sensor Board:** Se trata de la(s) placa(s) que aloja(n) los sensores y actuadores del sistema, integrando además la adaptación correspondiente. Contará con un pequeño microcontrolador que interactúa con los sensores/actuadores, adapta los valores medidos e implementa el protocolo de comunicación con la LB. Esta es una decisión estratégica del diseño: todos los sensores se comunicarán con la LB a través de un protocolo abierto y común de forma que cualquier sensor que lo implemente tendrá acceso a los servicios ofrecidos por el sistema.

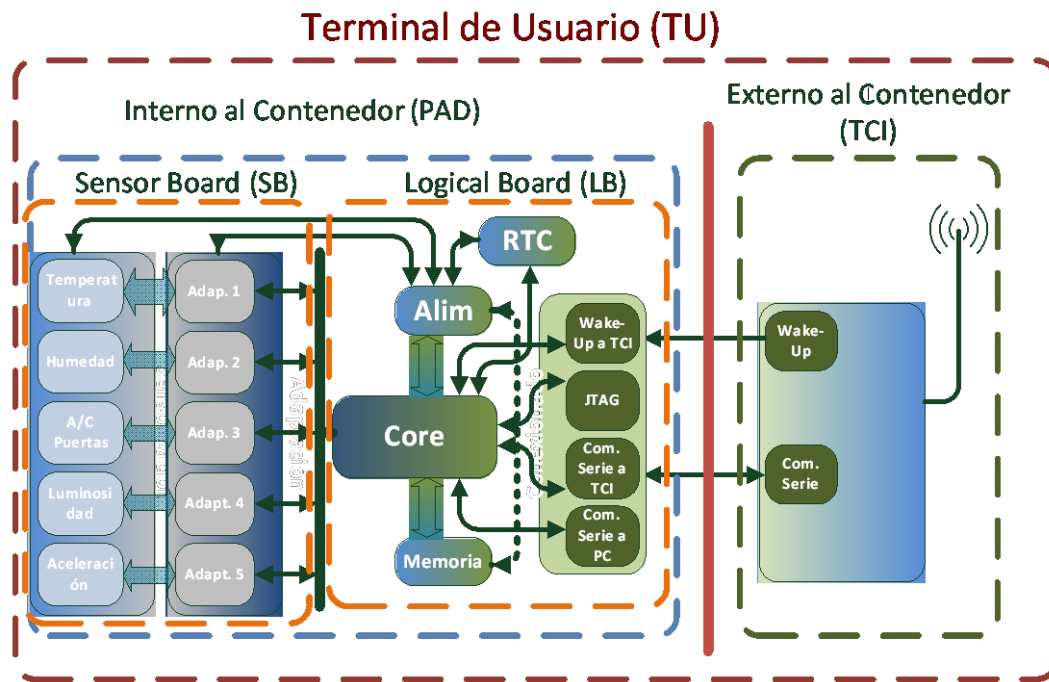


Figura 2 - 9. Arquitectura HW de los TUs

2.5.4.1. Logic Board (LB)

Como se ha comentado anteriormente, a nivel HW, la LB es una solución provista por la empresa ADEVICE Solutions S.L. No obstante, se considera interesante desarrollar el detalle de los distintos módulos hardware que la componen con el objetivo de que el desarrollo del sistema completo se encuentre autocontenido en este capítulo.

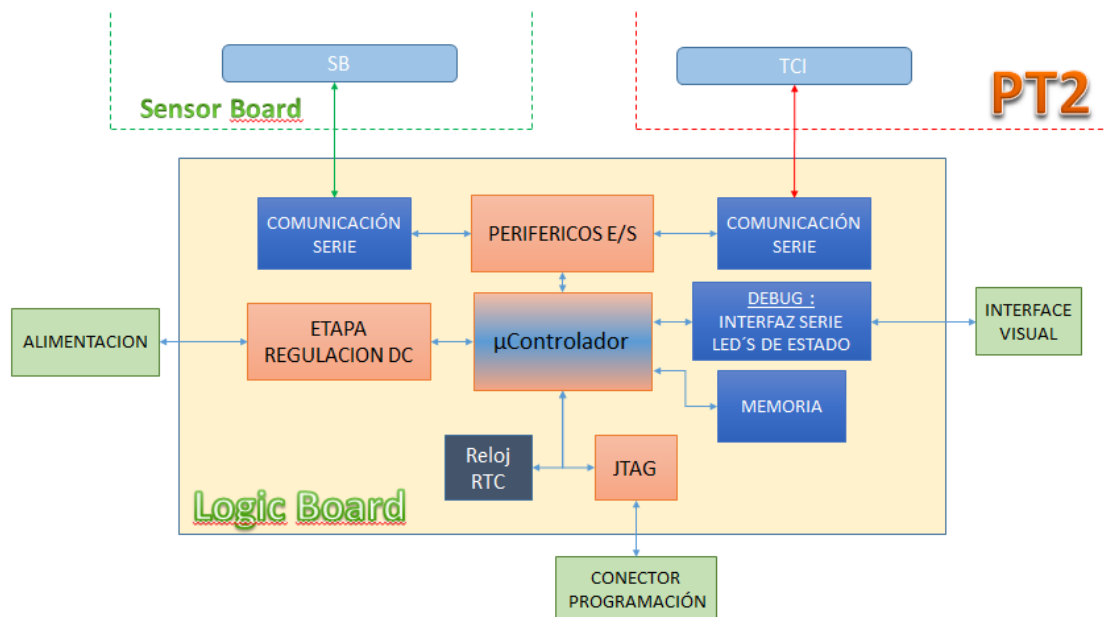


Figura 2 - 10. Arquitectura LB

- **μControlador:** Unidad Central de Proceso (CPU), es el que se encarga de tratar y procesar todas las señales de entrada y salida en función de un código de programación.

- **Regulación DC:** Componentes de filtrado de señales y regulación para que la tensión que alimenta al microcontrolador sea estable, con ello evitamos que ruidos e interferencias entren y afecten al buen funcionamiento del microcontrolador.
- **Reloj RTC:** un RTC de muy bajo consumo y con interfaz de comunicación serie (I²C), programable para despertar al microprocesador de la SB cada cierto tiempo y que se realicen funciones como la toma de muestras periódicas consiguiendo un ahorro notable de la energía de las baterías.
- **JTAG:** Etapa necesaria para la programación del Microcontrolador, incluye conector para programación externa.
- **Memoria:** Es necesaria para almacenar valores de variables y estados del programa.
- **DEBUG:** Dotada de un interfaz serie y unos leds de estado, para poder comunicarse online con el microcontrolador, a través de una interface visual, ya sea PC o PC portátil.
- **Periféricos E/S:** Etapa encargada de conectar los puertos de Entrada / Salida del micro con sus salidas físicas para cada sensor o actuador.
- **Comunicación Serie:** necesaria para comunicarse externamente con otras placas. En este caso se conectará con la placa **SB** y en el otro extremo con el TCI.
- **Alimentación:** la LB contará con un conector para la alimentación de todos los dispositivos electrónicos que conforman la placa. Esta alimentación será distribuida por toda la placa según necesidades.

2.5.4.2. Sensor Board (SB)

De la misma forma que se ha realizado con la LB, se realiza, a continuación, el detalle de la SB.

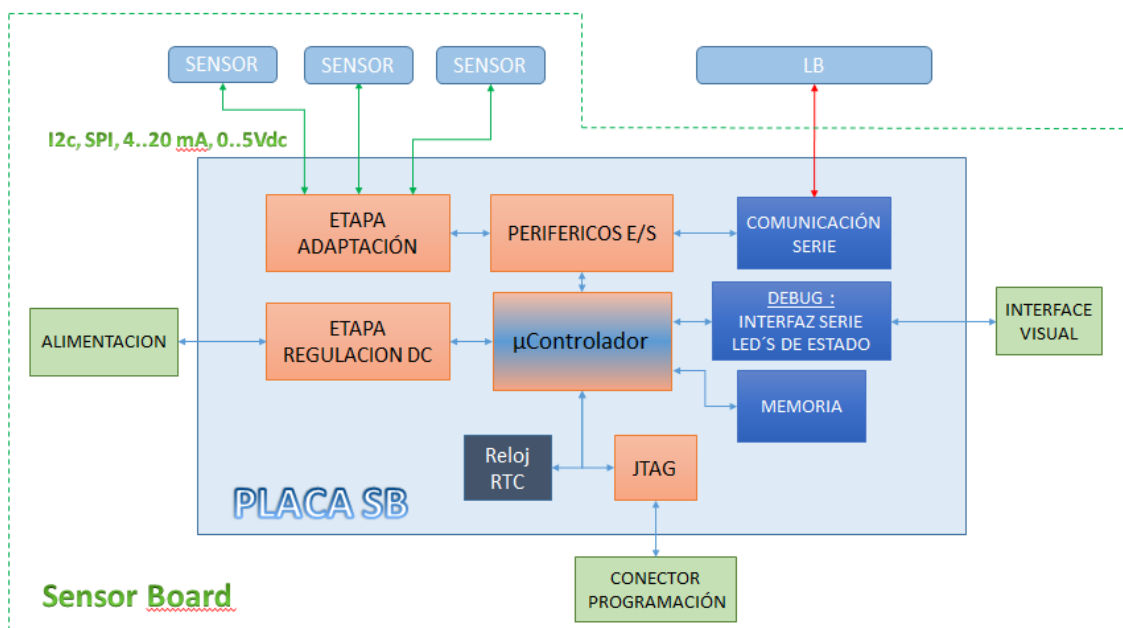


Figura 2 - 11. Arquitectura SB

Básicamente, la placa de **SB** lleva las siguientes etapas:

- **µControlador:** Unidad Central de Proceso (CPU), es el que se encarga de tratar y procesar todas las señales de entrada y salida en función de un código de programación.
- **Regulación DC:** Componentes de filtrado de señales y regulación para que la tensión que alimenta al microcontrolador sea estable, con ello evitamos que ruidos e interferencias entren y afecten al buen funcionamiento del microcontrolador.

- **Reloj RTC:** un RTC de muy bajo consumo y con interfaz de comunicación serie (I²C), programable para despertar al microprocesador de la LB cada cierto tiempo y que se realicen funciones como la toma de muestras periódicas consiguiendo un ahorro notable de la energía de las baterías.
- **JTAG:** Etapa necesaria para la programación del Microcontrolador, incluye conector para programación externa.
- **Memoria:** Es necesaria para almacenar valores de variables y estados del programa.
- **DEBUG:** Dotada de un interfaz serie y unos leds de estado, para poder comunicarse online con el microcontrolador, a través de una interface visual.
- **Periféricos E/S:** Etapa encargada de conectar los puertos de Entrada / Salida del micro con sus salidas físicas para cada sensor o actuador.
- **Comunicación Serie:** necesaria para comunicarse externamente con otras placas, en este caso se conectará con la LB.
- **Etapa adaptación:** Encargada de adaptar la señal de entrada de cada tipo de sensor, con el microcontrolador. Lógicamente cada etapa dependerá del sensor.
- **Alimentación:** Posibilidad de alimentar esta placa desde la LB o de forma independiente según las necesidades tanto de la propia SB como del sensor/actuador utilizado.

La implementación hardware de los bloques anteriormente detallados se traduce en el diseño de dos SBs distintas: por un lado, la SB1 que, además de los bloques comunes (microprocesador, etapa de alimentación, JTAG, UART, EEPROM, IIC, RTC e interfaz para sensores de terceros) incluye los sensores GPS (A2235-H, desactivado a nivel SW) y acelerómetro (LIS3DSH) y, por otro lado, la SB2 que, además de los bloques comunes contiene el resto de sensores anteriormente comentados: temperatura (Termopar Tipo K), humedad(SHT75), luminosidad (MAX44000), movimiento (EKMB110111) y puertas (HGDEST021A):

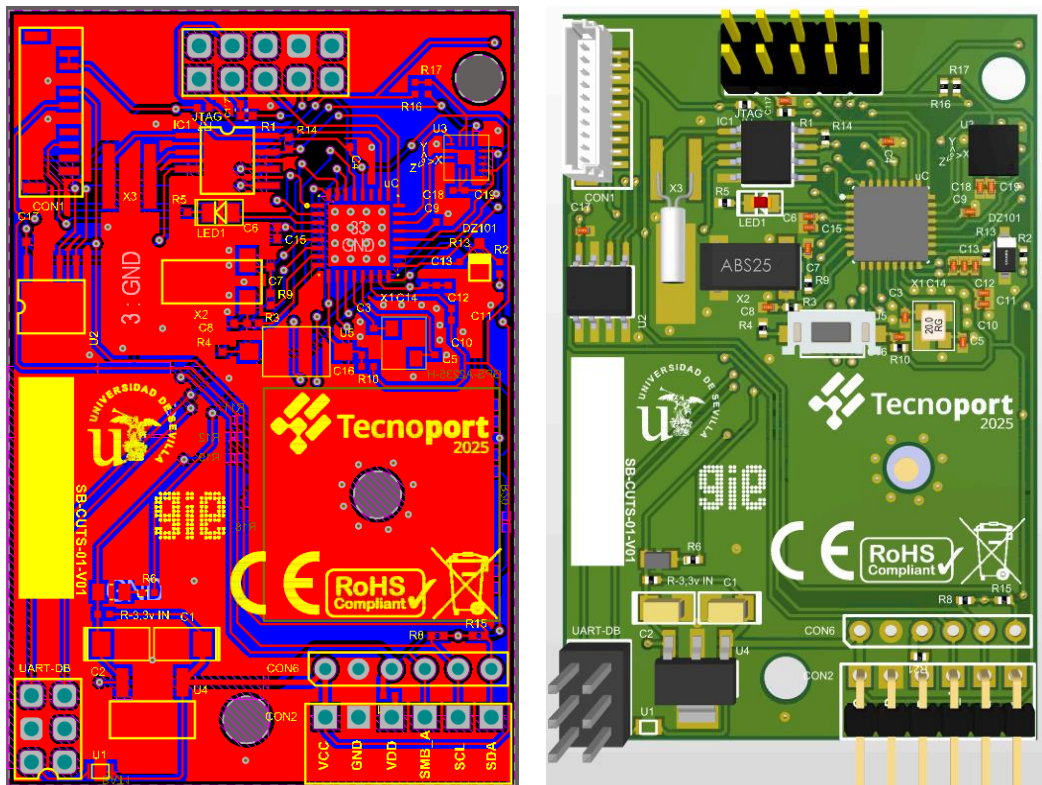


Figura 2 - 12. Diseño SB1. Izda. 2D, Dcha. 3D

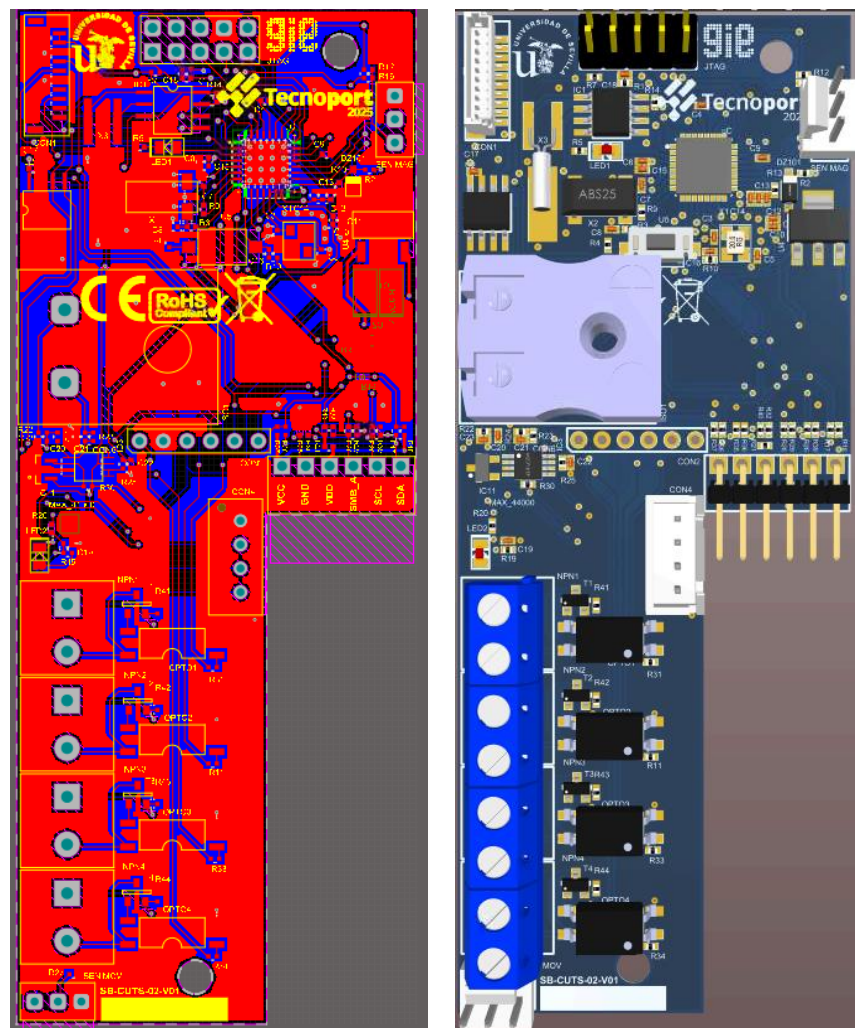


Figura 2 - 13. Diseño SB2 - Izda. 2D - Dcha. 3D

Como se puede apreciar, los formatos de cada una de las PCBs están personalizado para optimizar el espacio ocupado por estas y tener la mayor capacidad de integración posible tal y como se muestra en la Figura 2 - 14 y Figura 2 - 15.



Figura 2 - 14. Nodo Completo



Figura 2 - 15. Detalle nodo

Una vez analizada la arquitectura HW del sistema, pasaremos a analizar la arquitectura SW del sistema, la cual se detalla en el siguiente apartado.

2.5.5. Arquitectura SW

2.5.5.1. Torre de Protocolos CUTS

Desde el punto de vista SW, y tratándose de una arquitectura integradora de tecnologías, es necesario detallar la torre de protocolos de comunicación empleada para la interconexión de los distintos elementos. A continuación (Figura 2 - 16) se muestran las torres de protocolos utilizadas en cada dispositivo implicado en el sistema CUTS.

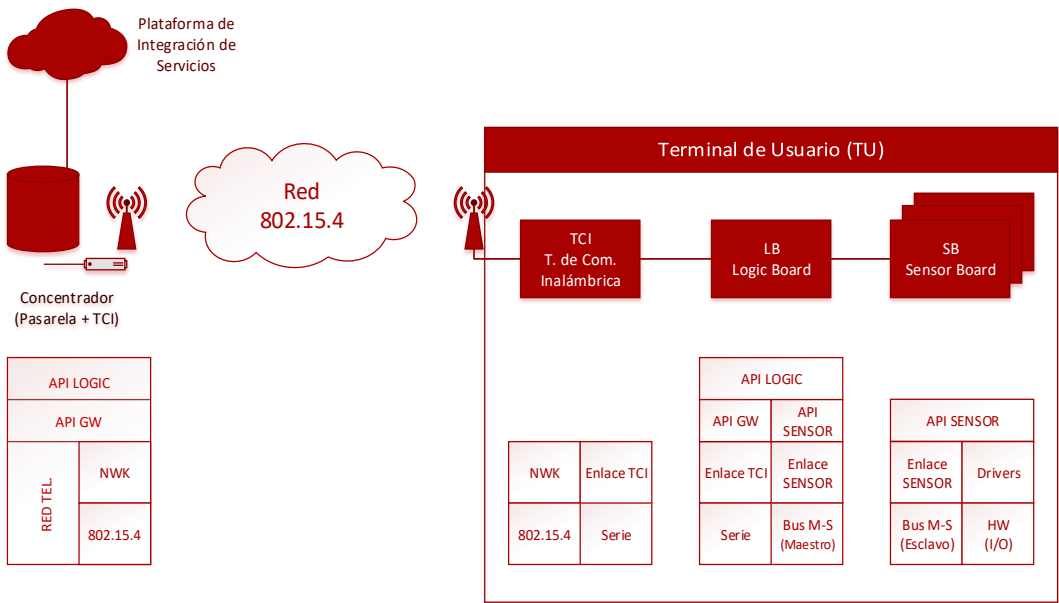


Figura 2 - 16. Torres de protocolos del sistema

En este punto es necesario comentar que a nivel de red se ha utilizado la pila IEEE 802.15.4, sobre la que se ha instalado una capa de nivel de red propietaria de la compañía suministradora de la red. Para la comunicación a alto nivel entre los dispositivos se han desarrollado las APIs correspondientes, las cuales no se incluyen en esta Tesis Doctoral debido a que exceden el alcance de la misma.

2.5.5.2. Descripción funcional SW CUTS

Desde el punto de vista de la arquitectura SW de la PAD, resulta interesante detallar la arquitectura funcional a nivel de software, detallando cada uno de los estados existentes en todos los casos de uso de dicho dispositivo.

A continuación se detalla el caso en el que SB (en color naranja) se encuentra permanentemente activa. Por su parte la LB (color azul oscuro) se encarga de recibir la información y enviársela al TCI (color verde), ubicado en el exterior del contenedor.

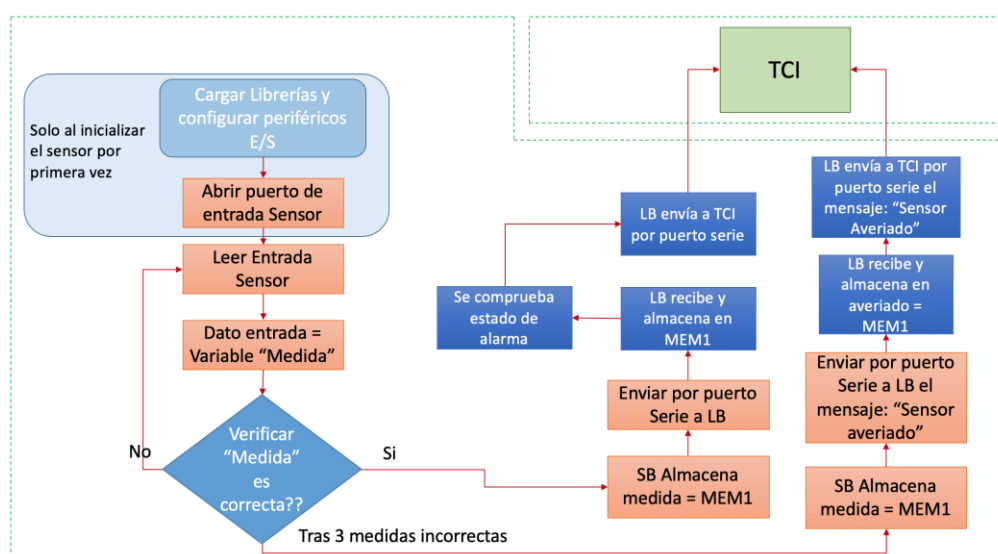


Figura 2 - 17. Diagrama flujo SB en estado ON permanente

Del diagrama anterior cabe comentar que el proceso denominado "LB envía a TCI por puerto serie" no es inmediato como tal, sino que supone un proceso el cual se detalla en el siguiente diagrama de flujo (Figura 2 - 18). Este esquema será el mismo siempre que aparezca el bloque "LB envía a TCI por puerto serie".

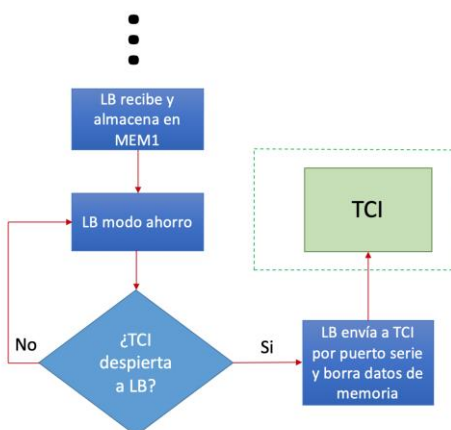


Figura 2 - 18. Proceso de envío de datos LB-TCI

A diferencia el caso anterior, en la Figura 2 - 21, se muestra el diagrama de flujo del proceso de medida bajo demanda desde la Plataforma Avanzada de Integración de Servicios.

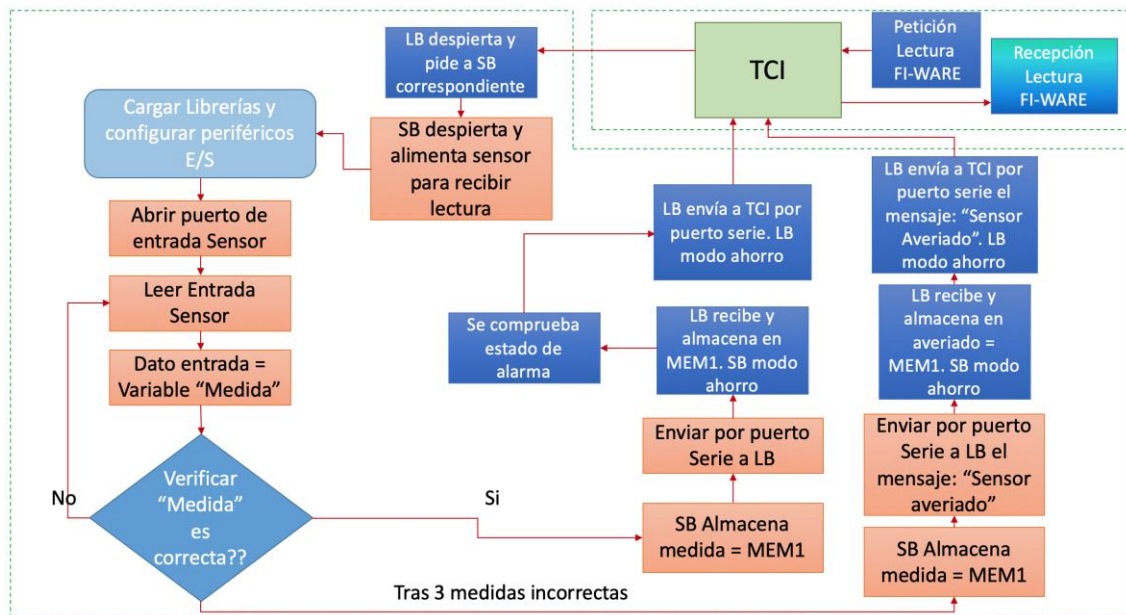


Figura 2 - 21. Diagrama flujo SW petición Lectura FI-WARE

Al igual que ocurría con el envío de información desde la LB al TCI que el proceso no es inmediato, ocurre algo similar a la hora de enviar información desde el TCI a la LB. El diagrama sería el siguiente.



Figura 2 - 22. Envío de información TCI-LB

Este diagrama es aplicable siempre que se envíe información desde el TCI al LB. Además, también sería análogo para el caso de envío de información desde el LB al SB.

El caso en el que se genere una petición de actuación desde la Plataforma de Integración de Servicios, el flujo sería el siguiente.

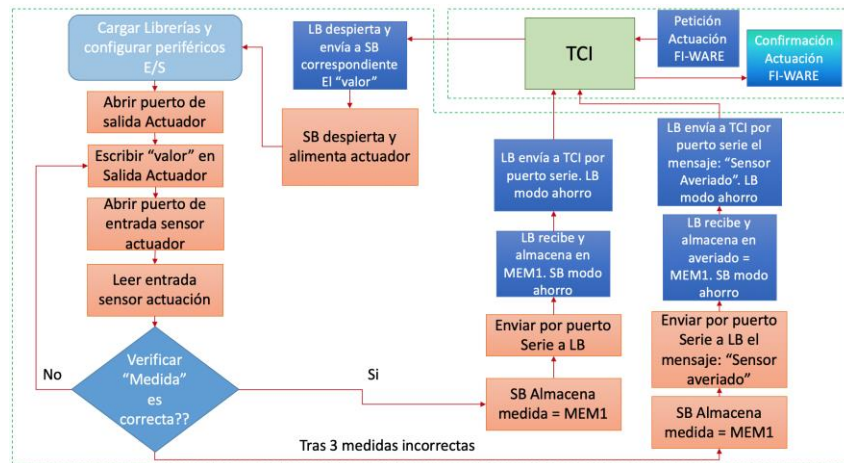


Figura 2 - 23. Diagrama flujo SW petición actuación desde FIWARE

Finalmente se detalla el diagrama de flujo del caso en el que es alguno de los sensores del sistema el que detecta un estado de alarma.

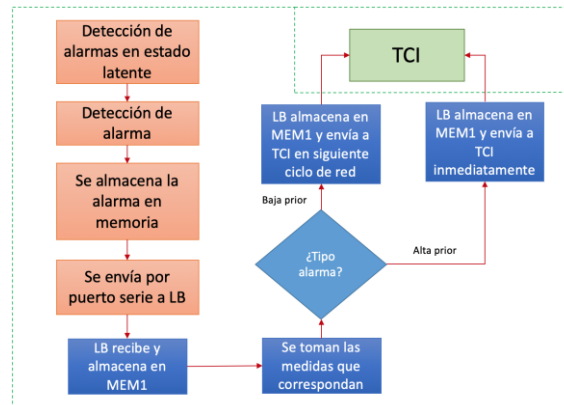


Figura 2 - 24. Diagrama flujo alarmas generadas por sensores

2.5.6. Red local IEEE 802.15.4

Como ya se ha comentado, el consumo de potencia es uno de los factores principales que determinará la posibilidad de usar el sistema en desarrollo con éxito o no. Para ello es importante tanto minimizar el consumo de la plataforma de adquisición como de las transmisiones inalámbricas de datos. Por este motivo, la tecnología seleccionada es el IEEE 802.15.4, que se encuentra dentro de las denominadas LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network). Este tipo de tecnologías se caracterizan por habilitar canales de comunicación para dispositivos de muy bajo coste a los que se les asigna una tasa de datos baja. Esto, como es lógico, va en favor de la minimización del consumo de potencia, lo que sitúa a este tipo de redes como la opción más viable para la aplicación que ocupa en este capítulo.

Otro de los factores que determinan su utilización en CUTS es la aparición de nuevas versiones del estándar que, además de las bandas de transmisión habituales (868-900 MHz y 2.4 GHz), habilitan una nueva banda en los 169 MHz con la que es posible alcanzar más de 10 km de alcance en espacio libre. Por tanto la convierten en una tecnología apropiada para trabajar en entornos electromagnéticamente hostiles como los que se presentan en las grandes concentraciones de contenedores de los patios de contenedores de los puertos o en los buques.

Como ya se ha comentado, aunque la implementación de estas redes no está dentro del alcance de esta Tesis, sí lo es la selección justificada y la configuración de la misma, por lo que es necesario recoger

las principales características de la tecnología, así como las distintas configuraciones que esta puede presentar.

2.5.6.1. Características de la Red IEEE 802.15.4

A continuación se detallan las principales características radioeléctricas de la red IEEE 802.15.4 seleccionada, así como las posibles configuraciones que esta puede adoptar, dependiendo del caso de uso.

IEEE 802.15.4	Especificaciones radioeléctricas
Frecuencia de Trabajo	169 MHz
# Canales	6 bidireccionales de 12,5 KHz de BW
Tasa de Datos	2.4 Kbps
Potencia	Seleccionable [14 dBm - 27 dBm]
Alcance libre	20 Km
Alcance urbano	5 Km
Antena Nodo	Entre 15 y 40 cm (dipolo arrollado)
Antena Concentrador	1 - 1.5 m tipo Yagi

Tabla 2 - 1. Especificaciones Radioeléctricas

IEEE 802.15.4	Especificaciones eléctricas
Alimentación	3.6 Vdc
Tipo	Baterías o Red Eléctrica
Consumo Rx	24 mA
Consumo Tx	45 mA @ 14 dBm - 340 mA @ 27 dBm

Tabla 2 - 2. Características eléctricas

El sistema contempla varias redes trabajando en distintos canales que coexisten entre sí con el objetivo de proporcionar servicio a lo largo de toda la cadena intermodal sin interrupciones. Por ello, además de coexistir, pueden adoptar distintas topologías, las cuales cuentan con características distintas, las cuales se detallan a continuación:

Tipo de Red	Característica	Especificaciones eléctricas
Red Síncrona en estrella	# Dispositivos	350 por canal
	Latencia	6 s (4 nodos), 500 s (350 nodos)
	Salto jerárquicos	0
Red síncrona en árbol	# Dispositivos	350 por canal
	# Routers	32
	Niveles de Routado	3
	Routers	Bajo consumo
Red asíncrona en estrella	Latencia	6 m (120 nodos)
	Objeto	Alarmas y señalización
Red asíncrona en árbol	# Dispositivos	350 por canal
	# Routers	8
	Niveles de Routado	3
	Latencia	Depende de la ocupación
General	Routers	No Bajo Consumo
	OTAU	Sí
	Configuración	Sí
	Almacenamiento sin red	Sí
	Bidireccionalidad	Sí
	<i>Payload</i>	Tramas de 10 a 90 Bytes

Tabla 2 - 3. Tipos de red y características

2.5.6.2. Despliegue de Red CUTS

La red desplegada para el demostrador CUTS contará con elementos de toda la jerarquía de red: TCIs, Routers (cuando sea necesario) y Concentradores de Red.

A continuación, se detalla el despliegue de red CUTS. El dimensionamiento está hecho principalmente para el demostrador del proyecto, no obstante la solución es perfectamente escalable.

Esta red estará dedicada al seguimiento y monitorización de contenedores. Por tanto, algunos de los requisitos más exigentes son tanto la autonomía como el número de dispositivos que pueden conectarse a la misma.

El despliegue de esta red cuenta con una complejidad elevada ya que es necesario realizar instalación en todos los puntos susceptibles de ubicar contenedores de mercancías. Por tanto, se realizará instalación en medio de transporte rodado (para alcanzar la terminal de contenedores de Madrid), ferrocarril (destinado a transportar las mercancías entre Madrid y el Puerto de Sevilla), en el recinto de la APS (donde se almacenarán las mercancías antes de ser transportadas a otro punto), en barco (dedicado a transportar las mercancías entre Sevilla y Canarias) y en los puertos destino de Canarias (Las Palmas y Tenerife).

El tipo de red que seleccionada es una red Síncrona con topología en Estrella (sin routers) o en árbol, en función de las necesidades de cobertura. Se implementa, además, un canal de alarmas para la comunicación de eventos de seguridad e información de máxima prioridad.

En cuanto al despliegue de equipos cabe comentar que, como es lógico, cada contenedor cuenta con un TCI instalado (alimentado por batería). Para la instalación de routers y concentradores es necesario separar por escenarios:

- Camión: El concentrador de red se instala en la cabina del mismo y es alimentado directamente desde el propio camión. En ningún caso se contempla la instalación de router.
- Tren: Se instala un concentrador de red en la cabina del mismo. Los concentradores de red deben estar alimentados en todo momento. Se estima que con una red sin routers (estrella) se puede cubrir todo el tren. No obstante, si no fuese posible se optaría por montar una red en árbol con 1 nivel de rutado. El router se instalaría en el tramo medio del tren y se alimentaría a través de batería.
- Barco: En este caso el número de Concentradores de Red depende del barco en cuestión. La idea primera es instalar un Concentrador en la cubierta y otro en la bodega del barco si este transportase contenedores en ella. Se estima que es suficiente con el de cubierta, no obstante, podrían añadirse los que fuesen necesario para dar cobertura al mayor número de contenedores posibles.
- Recinto Portuario: Se instalan los concentradores que son necesario para cubrir toda el área del recinto de la APS, garantizando sobre todo la cobertura en el patio de contenedores donde se almacenan. En este caso se estima que será suficiente con no más de 5 concentradores (alimentados externamente). Al optar por una red en estrella no se estima necesario el uso de routers. La misma configuración es aplicable a los puertos en las Islas Canarias.

En el demostrador se instalarán hasta 35 TCIs en sus correspondientes contenedores de mercancías, entendiéndose que ésta es una cifra representativa para validar el comportamiento del desarrollo realizado.

2.5.7. Demostrador CUTS

El demostrador CUTS consiste en el transporte de 35 nodos de extremo a extremo del corredor Madrid – Sevilla – Canarias, según la siguiente secuencia.

1. En Madrid, se cargan en un vehículo de transporte el conjunto de 35 nodos y son transportados por carretera hasta la terminal ferroviaria de Azuqueca de Henares. El vehículo está equipado con un concentrador de red CUTS.

2. Los 35 nodos son instalados en distintos puntos de la composición ferroviaria de *Continental Rail* con destino Sevilla, equipada con red CUTS, que los transporta hasta el puerto de Sevilla.
3. En el puerto de Sevilla, el conjunto de nodos es descargado y queda en la terminal del muelle del V Centenario (dotada con cobertura CUTS), a la espera de su embarque.
4. Los nodos son cargados en el buque *OPDR Andalucía*, en distintos puntos de su bodega, que los transporta hasta las Islas Canarias.
5. La primera mitad de los nodos son desembarcados en la terminal TCT de Santa Cruz de Tenerife, donde permanecen algunas horas.
6. La segunda mitad de los nodos son desembarcados en la terminal de La Luz de Las Palmas de Gran Canaria, donde permanecen algunas horas.
7. Tras su estancia en las terminales, los nodos son recogidos y retirados.
8. En todo momento, a través de la aplicación web CUTS, es posible conocer la posición geográfica de los contenedores y consultar los valores de los sensores instalados en los contenedores (temperatura, humedad, luminosidad, apertura de puertas, aceleraciones, etc.).

2.5.7.1. Despliegue de dispositivos

La solución desplegada en CUTS ha consistido en una red IEEE802.15.4 a 169MHz síncrona. El tiempo de red establecido en este caso es de 6 minutos, por lo que los distintos TUs, enviarán información con una periodicidad mínima de 6 minutos (6 minutos o más).

El despliegue de red ha constado de los dos tipos de elementos con los que cuenta la red CUTS: Concentradores y TUs.

Finalmente se han desplegado redes en 2 dos buques (OPDR Andalucía y Kalina), 3 terminales portuarias (Sevilla, Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria), un tren de mercancías (Continental Rail) y un Camión, con la configuración que se muestra en las siguientes figuras.

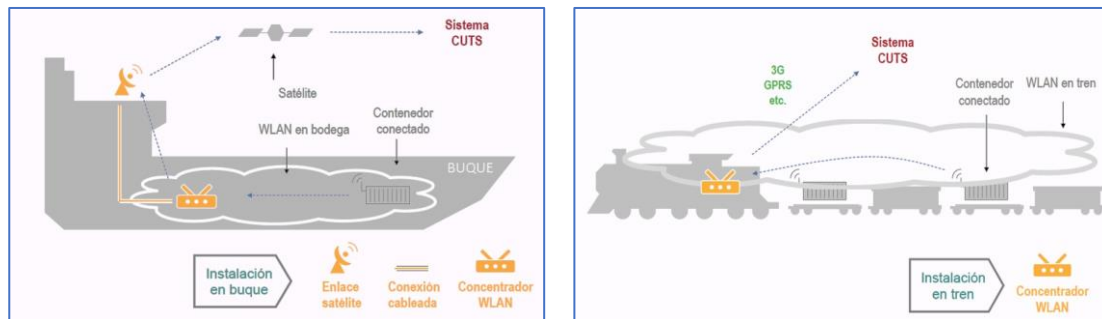


Figura 2 - 25. Despliegue de la LP-WPAN en Buques y Tren

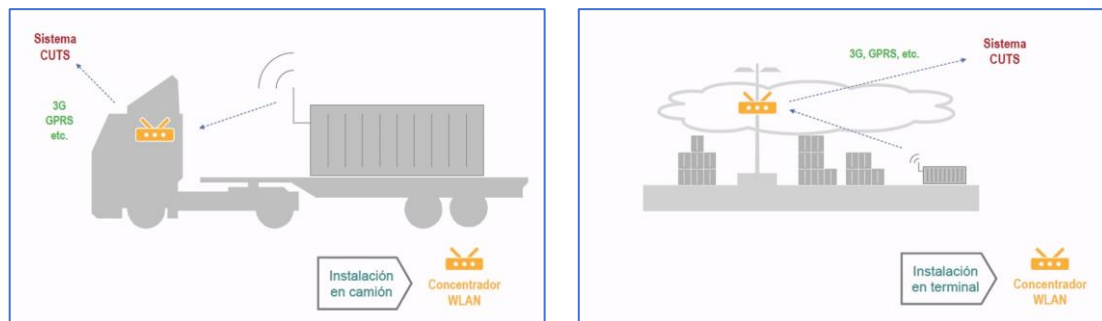


Figura 2 - 26. Despliegue LP-WPAN en Camión y Terminal Portuaria

2.5.7.1.1. Despliegue de Concentradores

A continuación, se listan los Concentradores de red desplegados, así como sus características de despliegue principales.

Característica	Buque OPDR Andalucía	Patio Cont. Sevilla	Patio Cont. Las Palmas	Patio Cont. Tenerife	Buque Kalina	Camión
Red	169MHz a 6 minutos					
Conexión	Satélite	Router 3G	3G	3G	Satélite	3G
Ubicación	Buque	(37,356208, 5998554)	- 28,147923, 15,416352	- 28.487464, 16.228787	- Buque	Camión

Finalmente se desplegó un concentrador adicional en el Buque Kalina, que, aunque está formando parte del demostrador, no cuenta con ningún TU instalado en su rango de operación, el propio Buque.

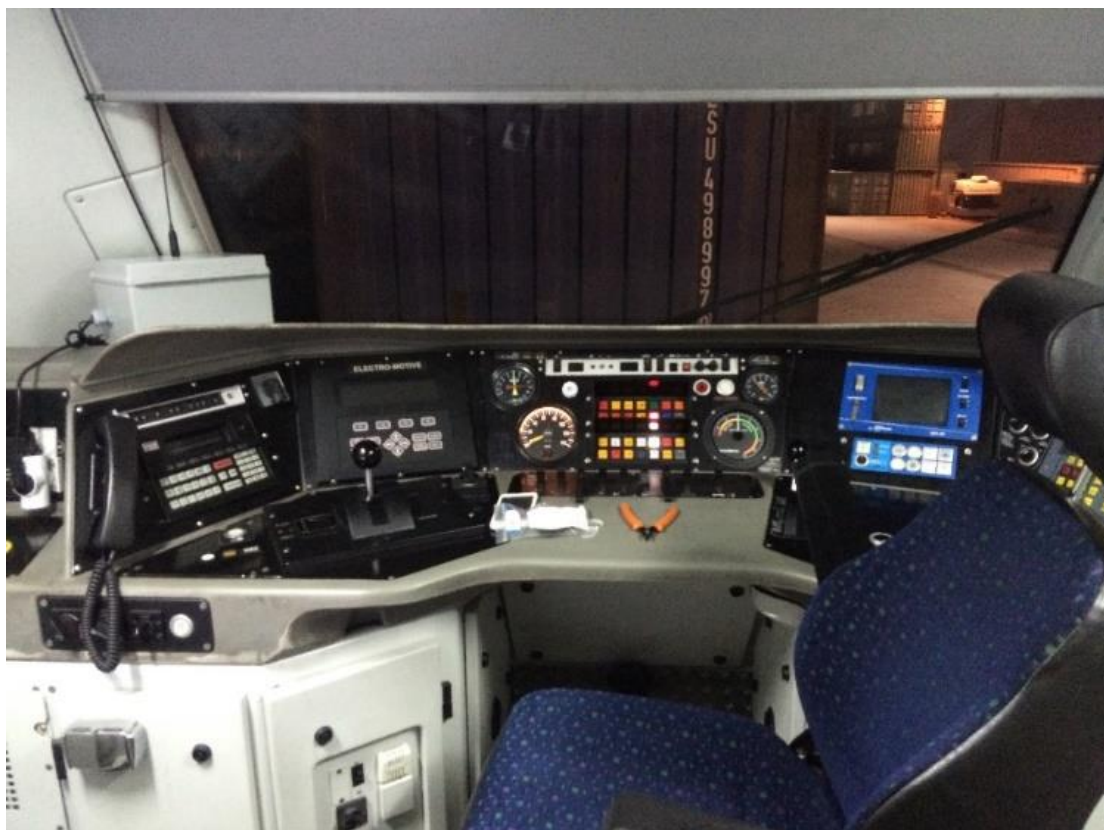


Figura 2 - 27. Concentrador en Tren

2.5.7.1.2. Despliegue de TUs

Con el objetivo de realizar un demostrador suficientemente significativo, inicialmente ser transportaron por carretera hasta un total de 6 TUs, desde el punto de origen (Torrejón de Ardoz) hasta la terminal de contenedores de Azuqueca de Henares.

Para la simulación del camión, se utilizó un coche que transportaba los TUs comentados, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.



Figura 2 - 28. Transporte de TUs por carretera

Una vez llegó a Azuqueca, se realizó el despliegue de los 35 TUs en los contenedores que transportaba la composición ferroviaria, tal y como se muestra a continuación. Es necesario remarcar que, con el objetivo de simplificar la instalación de los dispositivos, por tratarse de un demostrador, se optó por instalar ambas partes de lo TU (PAD y TCI) en el exterior de los contenedores, evitando abrir los contenedores. En un escenario real, la instalación en los contenedores se realizaría en el punto de origen, previo o durante la carga de la mercancía.



Figura 2 - 29. Instalación de TUs en Tren

Tras la llegada de la composición ferroviaria a la Terminal del Puerto de Sevilla, dichos contenedores fueron descargados en el patio de contenedores de la APS y, tras varias horas, los nodos fueron

distribuidos a lo largo del Buque OPDR Andalucía, simulando que los contenedores en cuestión habían sido embarcados en el buque, tal y como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 2 - 30. Llegada Tren a APS (Izda.), Instalación en Buque OPDR Canarias (Dcha.)

A continuación se detalla el despliegue realizado con el objetivo de remarcar que el despliegue se realizó a lo largo de todo el buque, simulando condiciones de trabajo real, unos en contenedores y otros en la estructura del buque.

#TU	Ubicación
TU-001	En contenedor
TU-002	Popa, pasillo bajo techo de contenedores
TU-004	Barandilla central izquierda
TU-005	En contenedor
TU-009	Puente, a la izquierda
TU-010	Puente, a la derecha
TU-013	Contenedor OPDR
TU-014	En contenedor
TU-015	Popa, mástil pequeño derecha
TU-018	Barandilla izquierda
TU-020	Barandilla derecha
TU-021	Popa, pasillo bajo techo de contenedores
TU-023	Bodega derecha

TU-024	Escalera subida a puente derecha
TU-025	Popa, barandilla
TU-026	En contenedor
TU-027	Barandilla derecha, proa
TU-028	Barandilla izquierda central
TU-029	Barandilla derecha, proa
TU-030	Barandilla derecha central
TU-031	En contenedor
TU-032	Popa, pasillo bajo techo de contenedores
TU-033	Barandilla derecha, proa
TU-035	Popa, en mástil pequeño izquierda
TU-038	Popa, mástil trasero pequeño derecha
TU-040	En contenedor
TU-049	Barandilla derecha
TU-050	Barandilla izquierda
TU-052	Popa, mástil central mirando a contenedores
TU-056	En contenedor
TU-057	Popa, esquina izquierda
TU-059	Puente a la izquierda
TU-060	Popa, mástil trasero pequeño izquierda
TU-064	Puente a la derecha
TU-069	Puente a la derecha

Figura 2 - 31. Despliegue de TUs en buque OPDR Andalucía

2.5.7.2. Resultados del Demostrador

Los resultados del demostrador cumplieron con los objetivos perseguidos y se validaron las soluciones aportadas a los retos tecnológicos presentados: se ha desarrollado un sistema de monitorización inteligente de contenedores de mercancías basados en un diseño IoT y soportado sobre una infraestructura abierta y colaborativa que permita a terceros el desarrollo de nuevas

aplicaciones que ofrezcan servicios de valor añadido o incluso la integración de nuevos sistemas sensores/actuadores.

Como se ha comentado previamente, las capas de alto nivel desarrolladas para el proyecto CUTS no forman parte del alcance de esta Tesis. Sin embargo, se van a usar estas para la ilustración gráfica de los resultados obtenidos del demostrador.

Así en las siguientes imágenes se puede apreciar tanto tracking de los contenedores como el registro de magnitudes adquiridas.

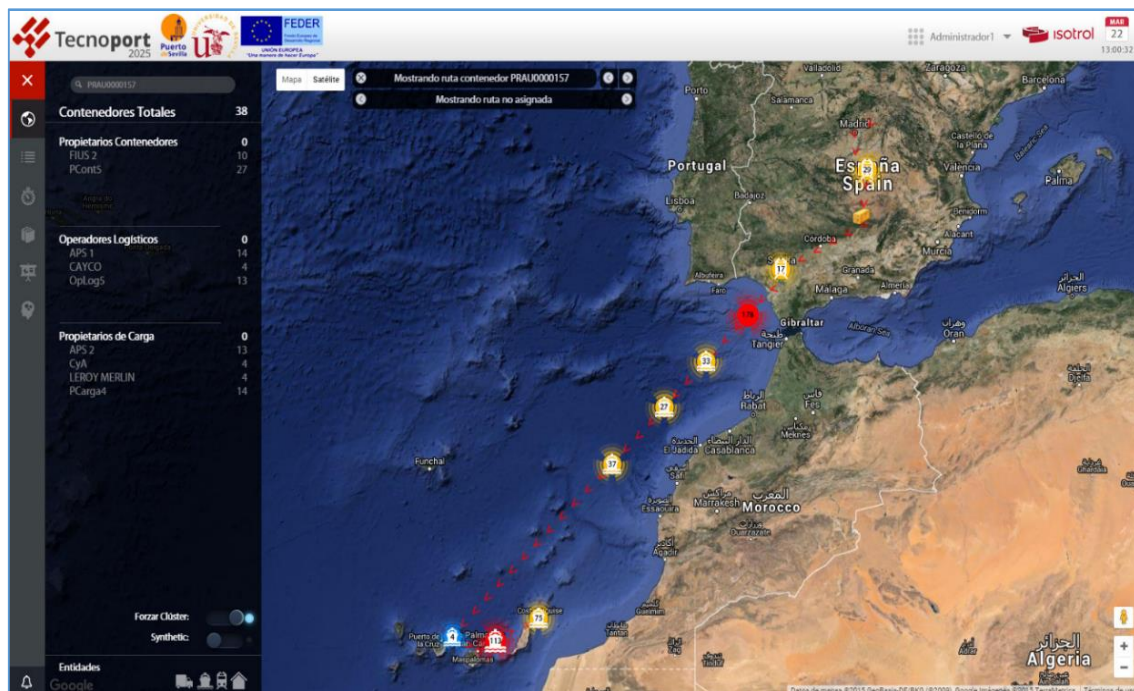


Figura 2 - 32. Monitorización Trayecto Madrid - Canarias

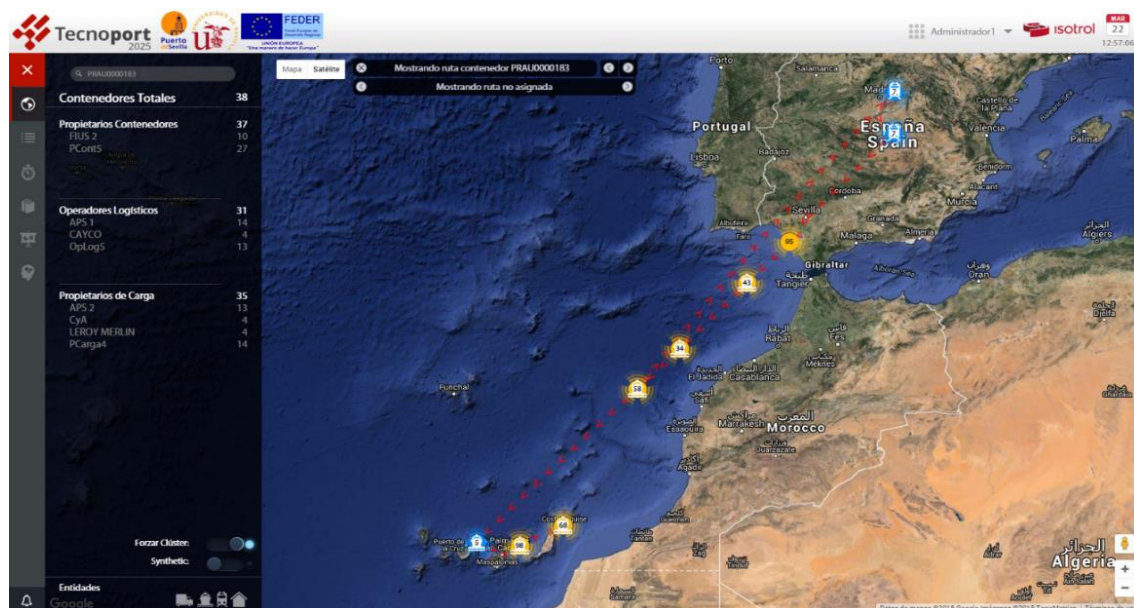


Figura 2 - 33. Monitorización Trayecto Madrid - Canarias - Madrid

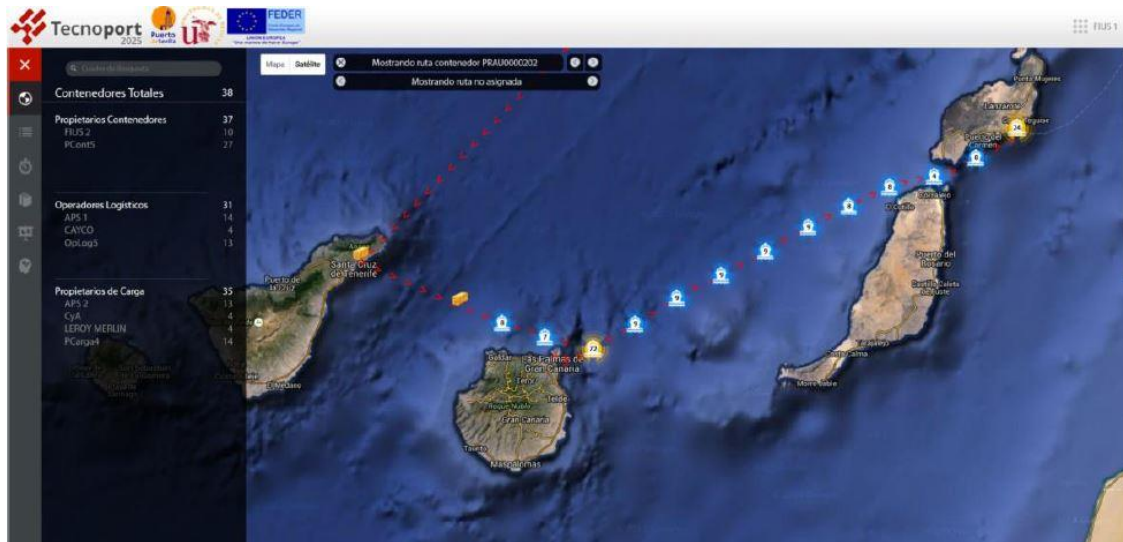


Figura 2 - 34. Trayecto Tenerife - Las Palmas – Lanzarote



Figura 2 - 35. Trayecto en Sevilla (Tren y Barco)

De la misma forma que la posición, el resto de magnitudes también son monitorizadas y se pueden ver en tiempo real, como se muestra a continuación:

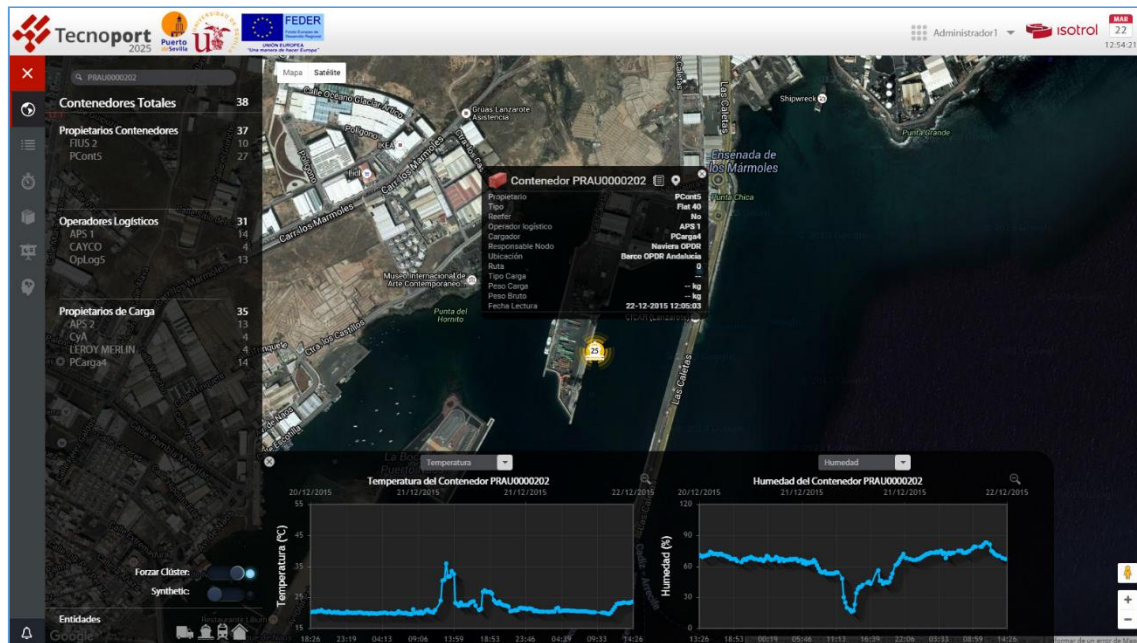


Figura 2 - 36. Monitorización Temperatura y Humedad

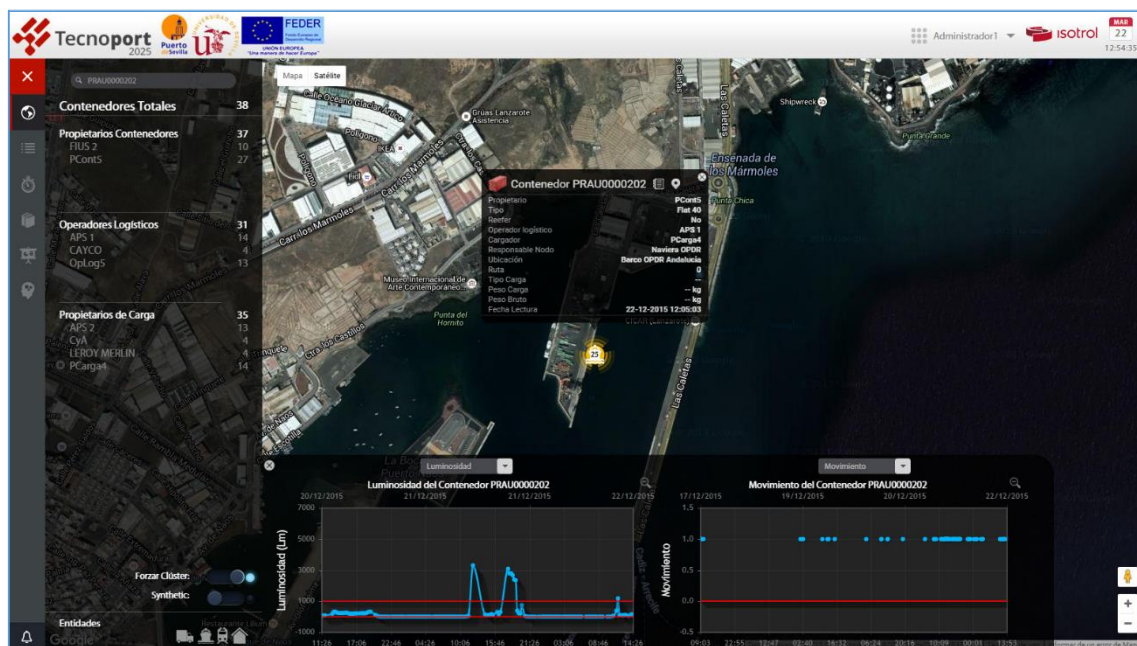


Figura 2 - 37. Monitorización Luminosidad y Detección de Movimiento

2.6. Conclusiones y problemáticas del Sistema CUTS

A lo largo de este capítulo se ha afrontado el diseño de un sistema de monitorización de contenedores inteligentes, global, abierto, de bajo consumo y bajo coste.

Para ello se ha realizado un estudio del estado de la técnica en el que se ha puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar un nuevo sistema que abarque y cubra las necesidades actuales, derivadas principalmente de la globalidad del servicio que se ofrece hoy día y de la utilización de redes de transporte intermodal. Este estudio ha puesto de manifiesto los principales retos tecnológicos a los que este desarrollo se enfrenta.

En este marco, y con el estado de la tecnología actual, se ha estimado que el paradigma IoT ofrece un enfoque de desarrollo que se adapta a la perfección a los retos tecnológicos que la monitorización de contenedores presenta.

En esta línea, se ha desarrollado el Sistema CUTS, que puede considerarse exitoso en base a los resultados obtenidos, los cuales han cubierto los requisitos fijados en su totalidad:

Por un lado, se ha desarrollado un sistema de bajo coste (nodos por precio inferior a 150€), despreciable frente a la mercancía de los contenedores y frente al propio contenedor, con capacidad de monitorizar y actuar en tiempo real sobre los contenedores de mercancías.

Además, la Plataforma de Adquisición desarrollada, presenta una serie de interfaces abiertas que, a través de una API de comunicación abierta y pública, posibilita la integración de cualquier sensor del catálogo de mercado incluso desarrollos realizados por un tercero.

Por otro lado, se ha dotado a los contenedores de la inteligencia necesaria para que pasen a ser un elemento activo de la cadena logística (capaz de diferenciar entre información de servicio, eventos o alarmas), proporcionando y recibiendo información suficiente para soportar nuevos servicios de valor añadido (geofencing, detección de irregularidades en el proceso de transporte, protocolos de seguridad, custodia de la cadena de frío, etc.) que mejoren el rendimiento de la cadena logística en general y cuyos beneficios repercutan directamente en toda la cadena logística.

También, con objeto de maximizar la autonomía de los dispositivos y, además, minimizar los costes de mantenimiento, se ha utilizado tanto un diseño HW como SW de bajo consumo y se ha optado por una red de comunicación inalámbrica de muy bajo consumo y gran alcance, basada en la tecnología IEEE 802.15.4 @ 169 MHz.

Para la superación de estos retos tecnológicos, ha sido fundamental la aceptación de la arquitectura IoT como arquitectura de referencia, lo que ha permitido la integración de la información de todos los contenedores, heterogénea por naturaleza. Esta información es transportada por una concatenación de redes también heterogénea, conformando lo que denominamos red abierta y colaborativa, hasta alcanzar la Plataforma Avanzada de Servicios Integrados. Esta plataforma se ha desarrollado (fuera del alcance de esta tesis) sobre FiWARE, la cual permite implementar los servicios de alto nivel deseado y posibilita acuñar el término *Smart Containers*.

De la misma forma que la interfaz abierta (HW y SW) a nivel de Terminal de Usuario posibilita la integración de nuevos dispositivos sensores/actuadores, la utilización de FiWARE como plataforma de integración posibilita la provisión de interfaces abiertas para que terceros puedan desarrollar las aplicaciones de valor añadido anteriormente comentadas, haciendo uso de la información provista de los sensores ubicados en los contenedores. En caso de explotación, esto generaría una comunidad y un mercado potencial elevado para el desarrollo de aplicaciones, que beneficiaría a todos los eslabones de la cadena intermodal.

De forma global, se ofrece un servicio perfectamente escalable, tanto a nivel de dispositivos como de aplicaciones, que además, ha sido validado con un demostrador real compuesto por un total de 35 nodos, tres medios de transporte (camión, ferrocarril y barco) y hasta 5 ubicaciones distintas (Madrid, Sevilla, Tenerife, Las Palmas y Lanzarote).

No obstante, el sistema CUTS, aunque cubre todos los requisitos fijados al inicio de su desarrollo, no ofrece solución óptima a algunos retos tecnológicos que supone la integración del sistema en el paradigma IoT.

Si bien estamos ante un sistema que ofrece solución de conexión para dispositivos en zonas radioeléctricamente muy hostiles, como puede ser una terminal de contenedores o un buque de mercancías, la información se transmite, en última instancia y hasta alcanzar la PAIS, por una red propietaria de un operador. Esto implica disponer de la cobertura que ofrece el operador en cuestión,

estando sometido a limitaciones de conectividad que tenga dicha red. No obstante, esto se podría solventar con el despliegue de nuevas redes locales.

Sin embargo, sería interesante que el uso de redes locales se limitara a los medios de transporte y a las terminales portuarias, dejando el resto del territorio a las redes de los operadores de telecomunicaciones: 3G/4G/5G en caso de transporte terrestre y satélite en caso de transporte marítimo. Es necesario tener en cuenta que la cobertura ofrecida por los operadores es cada vez mayor y que, probablemente en un futuro no muy lejano, sea posible utilizar redes de bajo consumo como NB-IoT o 5G. Las ventajas principales de utilizar este tipo de redes residen en que serán desplegadas en la mayor parte del territorio y serán mantenidas totalmente por los propios operadores de telecomunicaciones.

No obstante, la solución a los retos planteados no depende del diseño del sistema en tanto que no es posible aumentar la cobertura de la red móvil o migrar de tecnología modificando el diseño del Terminal de Usuario.

Finalmente, existe un problema intrínseco al tipo de solución adoptada y no resuelta por la solución CUTS ni por ninguna anterior. El problema radica en la necesidad de monitorizar la información desde el interior del contenedor y transmitirla al exterior del mismo para poder enviarla hacia la PAIS. Hasta el momento, todas las soluciones propuestas para esta solventar este punto son bastante agresivas con los contenedores, como la realización de perforaciones en las paredes del contenedor para pasar cables o la utilización de las juntas flexibles de los perfiles de las puertas para pasar cables o estructuras rígidas que rompen la estanqueidad de los contenedores y que, por tanto, están lejos de ser la solución óptima. No obstante, esto supone una oportunidad para superar un reto tecnológico que se abordará en siguiente capítulo.

2.7. Referencias

- [2 - 1] Universidad de Sevilla, U., Adevice Solutions, A., & Guadaltel, G. (2012). GETM (Gestion Electronica y Tracking de Mercancias). Memoria Inicial. http://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia_innovacion_estructura/122201412469.pdf.
- [2 - 2] Haque Munim, Z., & Scharamm, H. J. (2018). and logistics performance on economic growth: the mediating role of seaborne trade. *Journal of Shipping and Trade*, . <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0027-0>.
- [2 - 3] Coto-Millán, P., Pesquera, M. A., & Castanedo, J. (2010). 2 de intelligent Essays on Port Economics. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2425-4>.
- [2 - 4] Miler R. K, "Electronic container tracking system as a cost-effective tool in intermodal and maritime transport management," *Econ. Alternatives*, vol. 6, no. 1, pp. 40–52, 2015.
- [2 - 5] Conca, A., Febbraro, A. D., Giglio, D., & Rebora, F. (2018). Automation in freight port call process: real time data sharing to improve the stowage planning. *Transportation Research Procedia*, 30, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.009>.
- [2 - 6] Miler, R., & Bujak, A. (2014). Electronic cargo tracking systems as a part of the intelligent freight technologies. Their impact on the global integrated supply chain security and effectiveness based on the avante system.

- [2 - 7] Europa Press, E. (2019, 26 junio). El Puerto de Bilbao mejora un 45% su capacidad operativa. <https://www.europapress.es/turismo/transportes/navieras/noticia-puerto-bilbao-mejora-45-capacidad-operativa-20190626161443.html>.
- [2 - 8] El Ideal gallego, E. (2019, 25 marzo). El Puerto realiza mejoras en la red ferroviaria de los muelles interiores. Recuperado 1 de <https://www.elidealgallego.com/articulo/coruna/puerto-realiza-mejoras-red-ferroviaria-muelles-interiores/20190325211725401387.html>.
- [2 - 9] Autoridad Portuaria de Vigo, A. (2018). Declaración sobre la red ferroviaria del Puerto de Vigo. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiW3-rss8nkAhUm3OAKHauAC3AQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.apvigo.es%2Fes%2Fdescargas%2Fdescargar%2F4804%2Fmodelo%2520rfpv-1.pdf&usg=AOvVaw11zplKsL75y-sqAbSWQdTH>.
- [2 - 10] Murcia Economía, M. (2019, 14 enero). El Puerto invertirá 2,5 M€ en la mejora de la terminal ferroviaria de Escombreras. <https://murciaeconomia.com/art/60783/el-puerto-invertira-25-m-en-la-mejora-de-la-terminal-ferroviaria-de-escombreras>.
- [2 - 11] Autoridad Portuaria de Gijón, A. (2018b, 2 julio). Se inicia el proceso para que el tren llegue al Muelle Norte – Autoridad Portuaria de Gijón. <https://www.puertogijon.es/se-inicia-proceso-tren-llegue-al-muelle-norte>.
- [2 - 12] EFE, A. (2017, 21 agosto). La Autoridad Portuaria invertirá 100 millones en la mejora de los accesos ferroviarios a los puertos de Valencia y Sagunto. <https://www.lasprovincias.es/valencia-ciudad/autoridad-portuaria-invertira-20170821142545-nt.html>.
- [2 - 13] [Port of Vancouver, U. S. A. (2017, 1 junio). Port of Vancouver USA. <https://www.portvanusa.com/marine/decade-long-rail-improvement-project-nearing-completion/>.
- [2 - 14] Asian Development Bank, B. (2019, 10 septiembre). Railway Efficiency Improvement Project. <https://www.adb.org/projects/49111-005/main>.
- [2 - 15] Blue Growth Atlantic Vigo - Smart ViPort. <http://www.bluegrowthvigo.eu/proyecto/smart-viport>.
- [2 - 16] Mechanical Wave Driver - SF-9324: PASCO. https://www.pasco.com/prodCatalog/SF/SF-9324_mechanical-wave-driver/index.cfm.
- [2 - 17] Project: smartPORT: The Future of the Port. <https://future.hamburg/en/project/smartport/>.
- [2 - 18] Vis, I. F., & De Koster, R. (2003). Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(02\)00293-x](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(02)00293-x).
- [2 - 19] Voss, S., Stahlbock, R., & Steenken, D. (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum*, 26(1), 3–49. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>.

- [2 - 20] Stahlbock, R., & Voss, S. (2007). Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum*, 30(1), 1–52. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0100-9>.
- [2 - 21] Torralba Silgado, A. J., Gutierrez-Rumbao, J., Daza Rebollo, D., Rodriguez Serrano, A., Hidalgo, E., Gonzalez-Romo, J. M., . . . Gonzalez Carvajal, R. (2015, 7 septiembre). Smart Navigation System for the Port of Seville. *Smart Rivers* 2015, 1(2015), 1–7.
- [2 - 22] Torralba Silgado, A. J., Hidalgo, E., Peral, J. M., & Garcia, M. (2017, 1 febrero). TECNOPORT 2025: Bulding the iot-connected future in the port of seville. *www.porttechnology.org*, 1(76), 1–3. https://www.porttechnology.org/technical-papers/tecnoport2025_building_the_iot_connected_future_in_the_port_of_seville/.
- [2 - 23] Torralba Silgado, A. J., Gutierrez-Rumbao, J., Peral, J., Daza Rebollo, D., Rodriguez Serrano, A., Hidalgo, E., Gonzalez-Romo, J. M., . . . Gonzalez Carvajal, R. (2015, 7 septiembre). Smart ICTs for the enhancement of traffic logistics in the Port of Seville. *Smart Rivers* 2015, 1(2015), 1–7.
- [2 - 24] Ministerio de Fomento, M. (s.f.). El lenguaje del transporte intermodal. Vocabulario ilustrado. https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/pdf/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf.
- [2 - 25] European Commision, Department of Transportation of US and Federal Highway Administration of US (1998). Toward improved intermodal freight transport in Europe and the United States, next steps. Report of an Eno Transportation Foundation Policy Forum.
- [2 - 26] Journal, D. Internet Of Things Fleet Management Market Is Anticipated To See Huge Raise Due To Increasing Need For Optimum Operational Efficiencies And Vehicle Safety Till 2025: Grand View Research, Inc. - Press Release - Digital Journal. <http://www.digitaljournal.com/pr/3708382>.
- [2 - 27] Verma, S. (2018, 23 agosto). IoT in Transportation: From Fleet Monitoring to Inventory Management. <https://dzone.com/articles/iot-in-transportation-and-logistics-from-fleet-mon>.
- [2 - 28] Inmarsat Report - Industrial IoT: Maritime: Inmarsart, I. (2018, 3 octubre). Fleet Safety wins Safety4Sea Technology Award - Inmarsat. <https://www.inmarsat.com/press-release/fleet-safety-wins-safety4sea-technology-award/>.
- [2 - 29] A future ruled by IoT devices: Sustainable and Enhanced - Software solutions for logistics and supply chain companies | ESSPL. <https://www.esspl.com/iot-and-connected-device/>.
- [2 - 30] Craddock, R. (2005). Sensor fusion for smart containers. IEE Seminar on Signal Processing Solutions for Homeland Security, . <https://doi.org/10.1049/ic:20050272>.
- [2 - 31] GE Security to Submit CommerceGuard Container Security Solution for Test and Evaluation by U.S. Customs and Border Protection. <https://www.businesswire.com/news/home/20080521005303/en/GE-Security-Submit-CommerceGuard-Container-Security-Solution>.

- [2 - 32] Siemens, S. Commerceguard: Secure and Visible Glogal Trade.
<https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&cid1=A6V10217873>.
- [2 - 33] T.C. Lirn y m. S. Chiu, (2009) "A Study of the SMART container Monitoring system in the ocean shipping industry". Proceedings of the 14th ISL, Istanbul, Turkey.
- [2 - 34] Carn, J. (2011). Smart Container Management: Creating value from real-time container security device data. 2011 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST),. <https://doi.org/10.1109/ths.2011.6107912>.
- [2 - 35] Globe Tracker | GT Sense Reefer. <https://www.globetracker.com/gt-sense-reefer/>.
- [2 - 36] Triton International. <https://www.trtn.com/tritoncontainer>.

CAPÍTULO 3. DISEÑO, DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN POR ULTRASONIDOS IoT PARA MONITORIZACIÓN DE CONTENEDORES DE MERCANCÍAS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

SISTEMA DE INVENTARIO Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES DE TRÁFICO EN CARRETERAS Y ENTORNOS URBANOS BASADO EN RFID PASIVO.....	113
DISEÑO DE CONTENEDORES INTELIGENTES PARA LA GESTIÓN DEL TRACKING DE MERCANCÍAS BASADOS EN UNA RED DE SENSORES DE BAJO CONSUMO Y UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN NO INVASIVO	116
DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN NO INVASIVO PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS EN CONTENEDORES OPTIMIZADO EN ANCHO DE BANDA	143
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	152
REFERENCIAS.....	153

El presente capítulo surge como consecuencia de los retos tecnológicos planteados en el Capítulo 2, donde se ha descrito el diseño de un sistema de monitorización de contenedores de mercancías que presenta multitud de beneficios, aunque también algunos aspectos a mejorar.

El principal reto que propone el sistema comentado es el establecimiento de un canal de comunicaciones entre el interior del contenedor, donde se monitoriza la carga, y el exterior, desde donde se recoge la información proporcionada por los sensores y se transmite a la Plataforma de Integración de Servicios, según el paradigma IoT.

Hasta el momento en el que se ha desarrollado esta Tesis, los sistemas existentes en el mercado para la monitorización de contenedores ofrecen soluciones invasivas, basadas en el paso de un cable de comunicación a través de un orificio en las paredes del contenedor,

o bien utilizando las juntas tóricas flexibles existentes en la mayoría de los contenedores de mercancías. Ambas soluciones afectan a la estanqueidad de los mismos, la cual es un requisito imprescindible para multitud de tipos de mercancías.

En este capítulo se propone una solución basada en una comunicación por ultrasonidos entre el interior y el exterior de los contenedores de mercancías, la cual es optimizada posteriormente a partir del planteamiento y desarrollo de dos nuevas soluciones: una orientada a la optimización del consumo de energía y costes de implementación, y otra diseñada para la maximización del ancho de banda disponible. Estas soluciones son detalladas a lo largo del presente capítulo.

Los desarrollos descritos en este capítulo se enmarcan en dos proyectos en los que el autor ha estado implicado como perteneciente al Grupo de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla. Estos proyectos son:

GETM (Gestión Electrónica y Tracking de Mercancías): GGI3001IDIC

ECOTRANSIT (ECOsistema inteligente para un TRANsporte de mercancías sostenible, Seguro e Integrado): TEC2013-47286-C3-1-R

Estos proyectos han sido llevados a cabo por varios grupos de investigación y, por tanto, algunas de las herramientas utilizadas para el desarrollo de los sistemas que en este capítulo se presentan han sido implementadas, parcialmente, por dichos grupos de investigación, tal y como se indica en los puntos correspondientes de este capítulo. De este modo, algunos de estos diseños han sido incluidos en esta Tesis con la intención de que los desarrollos realizados se encuentren autocontenidos en el presente capítulo.

3.1. Introducción

Como se ha comentado en el capítulo anterior, uno de los retos que se presentan a la hora de diseñar e implementar un sistema de tracking de mercancías es el de habilitar una comunicación entre el interior de los contenedores, donde se toman las medidas, y el exterior, donde se realiza la comunicación con la plataforma de integración IoT, donde se alojan los servicios ofrecidos a los usuarios.

Esto es debido a que la inmensa mayoría de los contenedores de mercancías conforman una Jaula de Faraday, al tratarse de una estructura metálica que imposibilita o dificulta en gran medida la transmisión inalámbrica desde el interior del contenedor.

En este sentido, las soluciones académicas o existentes en el mercado, incluyendo CUTS, no abordan una solución a este problema y optan por la transmisión cableada entre el interior y el exterior del contenedor. Para ello utilizan, principalmente, dos métodos: por un lado, aquellos sistemas que directamente taladran el contenedor para pasar un cable (algo totalmente invasivo) y, por otro lado, aquellos que aprovechan para pasar el cable la flexibilidad de las juntas de estanqueidad (frisas) ubicadas entre las puertas y el lateral del contenedor.

Incluso este segundo método, lejos de suponer una solución ideal, genera una serie de problemas colaterales. En primer lugar, al insertar un elemento entre el lateral de una puerta y el lateral del contenedor, la junta que garantiza dicha estanqueidad se deforma dando lugar a pequeños huecos que hacen que el contenedor no se encuentre perfectamente cerrado, lo cual puede ser especialmente significativo en contenedores que transportan mercancía valiosa o refrigerada, para los que sea necesario garantizar la cadena de frío.

Adicionalmente, para el caso de emplear el lateral de la puerta como punto de entrada, el elemento que se introduce, que puede ser robusto o flexible como un cable, está sometido a una presión constante mientras las puertas están cerradas y al movimiento de éstas cuando se abren y cierran. Esto pone en riesgo la integridad del canal de comunicación entre ambos lados del contenedor por lo que, como se ha comentado anteriormente, dicho método está lejos de ser la solución ideal al problema.

Por tanto, habiendo puesto de manifiesto la existencia de un punto crítico, como es la comunicación entre el interior y el exterior de los contenedores, que pone en riesgo la validez de la medida y por tanto el funcionamiento del sistema de monitorización completo, se hace necesaria la búsqueda de una solución novedosa que suponga una evolución al sistema actual. De este modo, el objetivo será el diseño de un canal de comunicaciones alternativo no invasivo que garantice la correcta transmisión de la información, evite alterar la ergonomía de los contenedores y, por tanto, elimine la existencia de este punto débil o crítico.

3.1.1. Soluciones previas no invasivas para contenedores de mercancía

Existen, a nivel de patentes industriales, una serie de invenciones para su empleo en el mismo campo de aplicación que se presenta en este capítulo.

En [3 - 1] se presenta una aplicación novedosa en la que, mediante el uso de acelerómetros, se detectan las frecuencias de resonancia del propio contenedor en función de la carga que transporte, lo cual posibilitaría conocer si ha habido algún cambio en la carga transportada desde el exterior del contenedor. Sin embargo, este sistema no posibilita la monitorización de variables internas al contenedor, como las condiciones de la carga, la temperatura, la humedad, o características asociadas a medidas de seguridad como son el estado de las puertas, la luminosidad o la detección de movimiento en su interior. Por tanto, este sistema no cubriría los casos de uso propuestos en esta tesis.

En [3 - 2] sí se presenta un sistema en el que se transmite una onda electromagnética en el interior de contenedor y se compara con la onda recibida tras ser reflejada, empleándose el resultado para comprobar la existencia de elementos radiactivos o explosivos, o incluso el desplazamiento de la carga. De la misma forma que el ejemplo anterior, este sistema proporciona cierta información sobre la carga en el interior, aunque muy sesgada e insuficiente, por lo que no se puede emplear como solución para transmitir dicha información al exterior del contenedor para que pueda ser utilizada por un sistema externo.

Existen otras soluciones, exploradas y patentadas, que describen sistemas de transmisión de información desde el interior de los contenedores de mercancías, como la presentada en la patente [3 - 3]. No obstante, este sistema no está diseñado para minimizar el consumo, debido a las bandas de frecuencias que utiliza (hasta 10^{13} Hz). Así mismo, empleando estas frecuencias de trabajo, se está obviando el problema derivado de tratarse de un entorno muy hostil en lo que a la transmisión electromagnética se refiere.

Lo expuesto en los párrafos anteriores evidencia la falta de una solución completa que afronte las siguientes necesidades: la monitorización en el interior de los contenedores, la transmisión al exterior de éstos, la comunicación con una plataforma de servicios, e interfaces para el desarrollo de aplicaciones o para la integración de nuevos dispositivos sensores/actuadores.

En esta Tesis Doctoral, se propone actualizar el sistema desarrollado en el proyecto CUTS dotándolo de un sistema de comunicaciones que resuelva la problemática que supone establecer un canal de comunicación entre el interior y el exterior de los contenedores.

3.1.2. Ultrasonidos como tecnología de transmisión

La utilización de la transmisión de datos por ultrasonidos es una solución adoptada a lo largo de la literatura para ocasiones en las que se dispone de un canal de transmisión metálico que imposibilita la utilización de las tecnologías de transmisión inalámbrica convencionales (redes IEEE802.15.4, Bluetooth, WiFi, WiMAX, etc.). Algunos ejemplos de su uso como tecnología de transmisión de datos se pueden encontrar en las publicaciones [3 - 4]-[3 - 16], en las que se optó por el uso de la transmisión por ultrasonidos para solventar situaciones similares, aunque enmarcadas en otros campos de aplicación. En concreto, en este capítulo se describe el diseño de un canal de ultrasonidos para su aplicación en contenedores de carga.

La utilización de este tipo de tecnología respondería al esquema de la Figura 3 - 1, en el que se puede apreciar: un elemento transmisor a un lado del obstáculo metálico, que excita a un transductor de señal y genera la señal acústica; la pared metálica, que actúa de canal transmisor; y un elemento receptor al otro lado, que recibe la señal acústica y la vuelve a convertir a señal eléctrica.

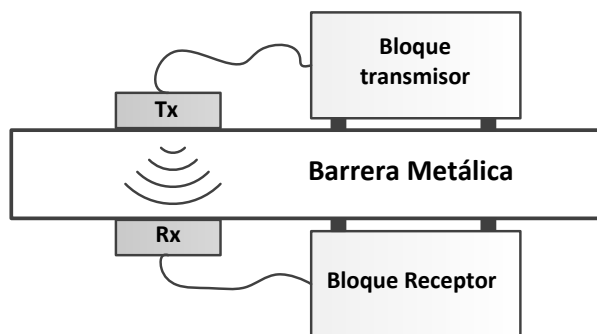


Figura 3 - 1. Esquema de transmisión de datos por ultrasonidos

La tecnología basada en la transmisión por ultrasonidos ofrece diferentes variantes en cuanto al tipo de transductor a utilizar. Los tres tipos de transductores principales son:

- **Basados en ondas electromagnéticas.** Se trata de un tipo de tecnología muy interesante debido a que los costes de mantenimiento son mínimos y además no necesitan de ningún elemento adaptador de impedancias entre los transductores y el canal metálico al ser necesario el contacto entre el dispositivo y el canal metálico, lo cual los hace muy atractivos [3 - 17]. Sin embargo, presentan como principal inconveniente el bajo rendimiento o eficiencia en lo que a transmisión de datos se refiere, presentándose aptos solamente para su utilización en casos en los que el grosor de la barrera metálica es muy pequeño. En el caso de nuestra aplicación esto supone un problema, pues la variedad de contenedores de mercancías existentes es muy elevada, así como la de los patrones o estándares de fabricación.
- **Basados en tecnología láser.** Se trata, al igual que en el caso de los basados en ondas electromagnéticas, de una tecnología muy atractiva desde el punto de vista de su eficiencia [3 - 18] y [3 - 19] además de que los dispositivos no necesitan estar en contacto con la interfaz metálica, aunque el elevado coste de los dispositivos elimina cualquier posibilidad de su utilización en contenedores de carga, ya que la minimización del coste del sistema es uno de los requisitos principales.
- **Basados en piezoeléctricos.** Se trata, en principio, de la opción más atractiva debido a que presentan la mejor eficiencia en cuanto a transmisión de datos a través de un canal metálico [3 - 12], además de existir una gran variedad de modelos en mercado. Dicha competitividad maximiza las posibilidades contar con soluciones de bajo coste, así como las de migración futura, al no estar sujetos a un solo fabricante. Se trata, además, de la tecnología más madura de las tres presentadas, la de menor tamaño y su eficiencia en lo que a transferencia de potencia hace posible su aplicación para aplicaciones de *Harvesting*. Sin embargo, este tipo de transductores presentan un inconveniente adicional: necesitan estar en contacto con la superficie metálica y, en muchos casos, la utilización de un gel que actúe como adaptador de impedancias entre el propio transductor y el canal metálico. Además, presentan el inconveniente de ser sensibles a la interferencia entre símbolos (ISI) producida por las reflexiones multi-trayecto en el canal de transmisión. Dicho efecto puede ser minimizado utilizando bajas frecuencias de transmisión

Por tanto, debido a su menor tamaño, a su mayor eficiencia energética y en la transmisión de datos, y al hecho de tratarse de la tecnología más madura de las tres, (aun contando con el inconveniente de la adaptación de impedancias), la tecnología basada en piezoeléctricos se presenta como la mejor opción para la aplicación objetivo.

Prueba de ello, es la utilización de este tipo de tecnologías en el despliegue de redes de comunicación en barcos o buques militares, donde existen multitud de compartimentos estancos, completamente sellados por metal, a los que se desea dotar de comunicación inalámbrica para el control de los sistemas ubicados en dichos compartimentos, tal y como se puede apreciar, a modo de ejemplo, en la Figura 3-2 [3 - 12].

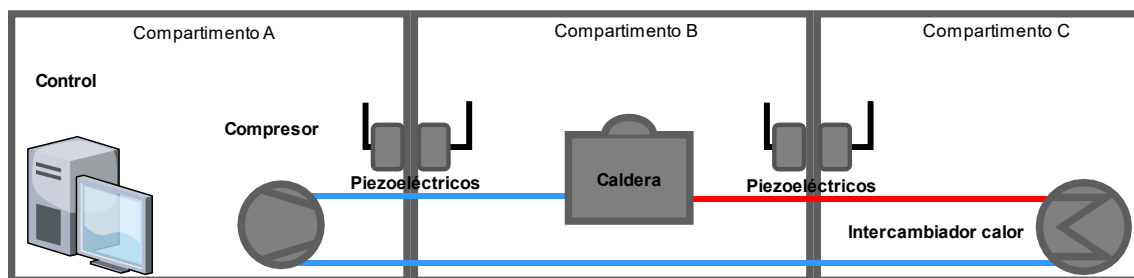


Figura 3 - 2. Ejemplo de utilización de Piezoeléctricos

Otros ejemplos de la utilización de esta tecnología pueden encontrarse en [3 - 7], donde se emplea una tasa de transmisión muy baja, de 435 bps, en una aplicación de bajo ancho de banda y bajo consumo, o en [3 - 12], donde se alcanzan hasta los 5 Mbps utilizando técnicas de cancelación de eco.

Por tanto, dado el amplio catálogo de sistemas en los que se ha usado la transmisión por ultrasonidos como tecnología habilitadora para casos de uso similares, se puede concluir que es la tecnología más madura de las estudiadas, junto a una modulación suficientemente *sencilla* que garantice la transmisión de la información sin elevar significativamente el consumo de energía. El desarrollo de la solución propuesta, cuya conceptualización y validación experimental han sido publicadas, respectivamente en [3 - 20] y [3 - 21], se detalla en los siguientes puntos.

3.2. Diseño de Contenedores Inteligentes para la gestión del *tracking* de mercancías basados en una red de sensores de bajo consumo y un sistema de adquisición no invasivo

El diseño del sistema propuesto parte del trabajo realizado en el Capítulo 2 de esta Tesis, y tiene como objetivo principal optimizar el rendimiento del mismo, dotándolo de una interfaz de comunicación no invasiva que evite la perforación o modificación de los contenedores para utilizar una comunicación cableada. Al mismo tiempo, esta solución tendrá un impacto directo sobre el tiempo de instalación (mínimo) y en los costes de mantenimiento de estos sistemas.

El desarrollo de este sistema se enmarca dentro del proyecto GETM (Gestión Electrónica y Tracking de Mercancías), liderado por la Universidad de Sevilla (Grupo de Ingeniería Electrónica y Grupo de Ingeniería de Organización) y con la participación de las empresas Guadatel S.A y ADEVICE Solutions S.L, las cuales aportaron su conocimiento y experiencia en tareas adicionales, como el diseño de los algoritmos logísticos para las autoridades portuarias, el diseño de la red inalámbrica de comunicaciones, o la base de datos y el motor web que procesa y ofrece los servicios a los usuarios del sistema. Algunos de estos puntos se comentan resumidamente a lo largo de este capítulo, con los objetivos de que la descripción del sistema se encuentre autocontenida y de que el sistema desarrollado se encuentre contextualizado en un marco de trabajo completo, aunque algunos de estos desarrollos no pertenecen al alcance de esta Tesis.

3.2.1. Descripción general del sistema

Como se ha comentado previamente, se propone una solución completa para el *tracking* de contenedores de mercancías, así como la monitorización de diversas variables que aseguran conocer el estado del contenedor y de la propia carga.

Tomando como referencia el sistema CUTS, el desarrollo propuesto cuenta con los mismos bloques funcionales, a excepción de que la comunicación cableada ente los bloques internos y externos al contenedor es sustituida por un sistema de comunicaciones basado en ultrasonidos, tal y como se detallará en los siguientes puntos.

Por tanto, los bloques funcionales que conforman el sistema completo son los siguientes:

- Plataforma de Adquisición instalada en el interior de los contenedores, la cual cuenta con capacidad tanto para monitorizar las variables deseadas en el interior de los contenedores, como para controlar los actuadores que se encuentren debidamente adaptados.
- Sistema de comunicación no invasivo basado en ultrasonidos para la transmisión de información entre el interior y el exterior de los contenedores de mercancías, evitando taladrar o romper la estanqueidad de éstos.

- Controlador externo encargado de conectar la red inalámbrica que llega hasta la plataforma IoT con los sensores/actuadores ubicados en el interior de los contenedores.
- Red inalámbrica de bajo consumo y baja tasa de datos encargada de dotar de conectividad transparente a los nodos instalados en los contenedores de mercancías, de manera que éstos puedan comunicarse de una forma segura y robusta con la Plataforma de Integración de Servicios, de acuerdo con el paradigma IoT.
- Una base de datos y un servidor web con capacidad de procesar los datos de los contenedores y ofrecérselos a los usuarios del sistema.

Así mismo, los módulos descritos anteriormente deben satisfacer una serie de requisitos funcionales, los cuales se resumen a continuación:

- Capacidad para trabajar en condiciones ambientales extremas, con temperaturas desde -25 °C a 100 °C y niveles de humedad relativa entre el 0% y el 100%. Esto garantiza la operatividad del sistema en cualquier ubicación.
- Usabilidad en entornos hostiles desde el punto de vista electromagnético, como es el caso de los patios de contenedores metálicos. Por ello se selecciona una red basada en IEEE 802.15.4 en la banda de 868 MHz, lo que garantiza una alta capacidad de penetración y la adaptación a entornos hostiles.
- Minimización de la atenuación en el canal metálico para garantizar la transmisión de datos entre el interior y el exterior del contenedor, para lo que se selecciona una frecuencia de portadora tan baja como ha sido posible (40 KHz), la cual minimizará, además de la atenuación, el efecto multi-trayecto. Así mismo, se selecciona una modulación tipo DBPSK, debido a su simplicidad, su robustez ante fallos y el hecho de que implementa una demodulación no coherente, la cual permite que ésta se realice sin necesidad de sincronizar transmisor y receptor.
- Grado de protección IP67 o superior, lo que garantiza su integridad durante su utilización.
- Capacidad de almacenamiento de datos superior a la cantidad de datos generados durante un trayecto. Este requisito garantiza la conservación de todos los datos medidos durante un trayecto en caso de que la red de comunicación no estuviera operativa.
- Simplificación de los diseños electrónicos con el objetivo de minimizar el tamaño de los dispositivos a instalar en los contenedores.
- Minimización del consumo para garantizar la autonomía de los nodos durante largos periodos temporales (del orden de años), de forma que los costes de mantenimiento se reduzcan tanto como sea posible. Para ello se utiliza una red de comunicaciones basada en el estándar IEEE 802.15.4 que está orientada a sistemas de muy bajo consumo. A nivel de baterías, en una primera implementación se seleccionaron baterías NiMH, las cuales fueron descartadas posteriormente por su bajo rendimiento cuando son sometidas a temperaturas extremas. Las baterías de Litio presentan mejor rendimiento en estas condiciones, por lo que son la opción finalmente seleccionada.
- Instalación sencilla para evitar procesos complejos que requieran de periodos de tiempo significativos y que, por tanto, afecten a los costes de mantenimiento del sistema.
- Diseño de bajo coste basado en la utilización de electrónica integrada y diseños sencillos, a la vez que robustos, de forma que el coste del sistema sea irrelevante frente al coste de los contenedores donde se instalan.
- Comunicación por ultrasonidos robusta y fiable, para lo que se implementa un protocolo de comunicación y entramado que se define en el punto 3.2.2.4.1.

Por otro lado, a nivel de implementación funcional, la arquitectura genérica del sistema estará compuesta por los bloques que se muestran Figura 3 - 3 [3 - 21].

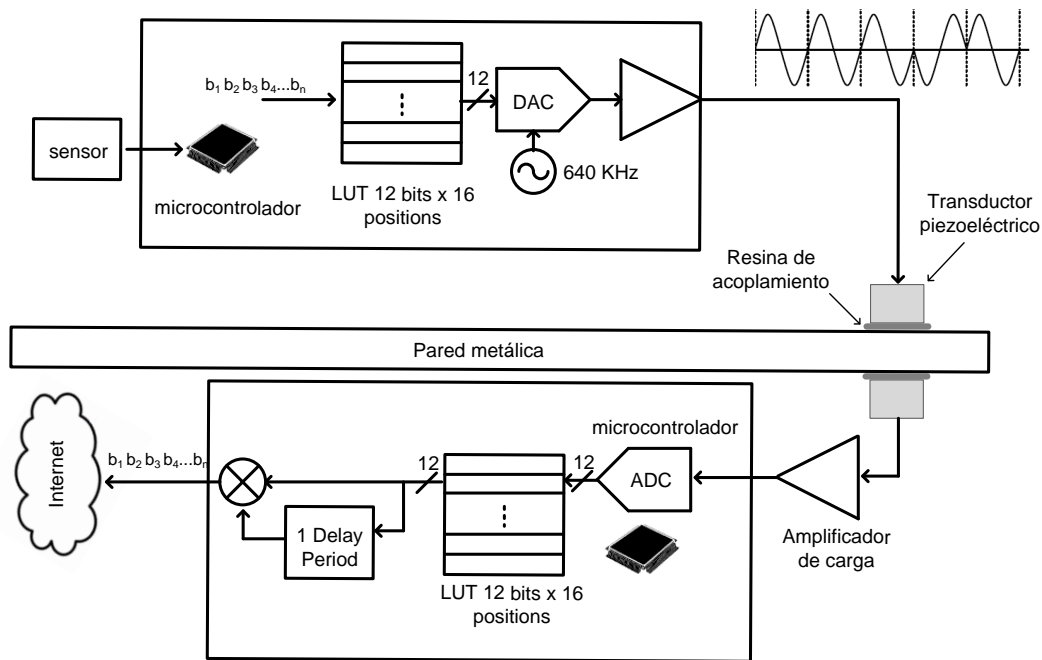


Figura 3 - 3. Detalle de implementación

Como se puede apreciar, el microcontrolador generará la señal utilizando una *look-up table* (LUT) de 16 posiciones y realizará la modulación de ésta directamente con el convertidor digital-analógico (DAC). La salida de éste pasará por un buffer y una red de adaptación de impedancias (si fuera necesario) hasta alcanzar el piezoeléctrico transmisor. En el lado receptor el proceso es el inverso, haciendo pasar la señal por la red de impedancias, el buffer y el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador para ser demodulada digitalmente. Cada uno de estos bloques será detallado en los siguientes puntos.

3.2.2. Diseño completo del sistema de ultrasonidos

3.2.2.1. Selección del transductor y caracterización preliminar

Una vez seleccionada la tecnología basada en piezoeléctrico fue necesario hacer un estudio del catálogo de mercado, a partir de la comparativa entre distintos fabricantes, tales como Panametrics, Multicomp, Prowave, GE Inspection Technologies, Kobitone, Murata o American Piezoelectric.

Dicha comparativa se realizó atendiendo a diversos parámetros, tales como precio, diámetro, tensión de entrada necesaria, entornos de aplicación y rango de frecuencias.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, con el fin de minimizar las reflexiones multi-trayecto y la atenuación de la señal a lo largo del canal metálico, es necesario trabajar a frecuencias de portadora bajas (del orden de KHz). Por este motivo, se adquirieron transductores con estas frecuencias de trabajo, ya que, de otro modo, se necesitarían excitar con elevadas tensiones (del orden de decenas de voltios), las cuales elevarían el consumo del sistema enormemente. Además, la baja tasa de datos necesaria para transmitir los datos proporcionados por los sensores desde el interior del contenedor permite el uso de transductores de un reducido ancho de banda. Concretamente, se han adquirieron aquéllos que cubren la banda desde los 40 a los 300 KHz, es decir, los proporcionados por los fabricantes Kobitone, Prowave, Multicomp y Murata.

Se realizó una primera caracterización experimental de dichos transductores, con un montaje como el mostrado en la Figura 3 - 4, basado en una excitación de 3.3 V a la entrada del piezoeléctrico

transmisor, un piezoeléctrico receptor conectado a un osciloscopio, y un canal de comunicación implementado por una pieza de acero de 10 mm de grosor, el cual es superior a los grosores estandarizados para contenedores de carga, concretamente en las normas ISO-668 y ISO-1496.

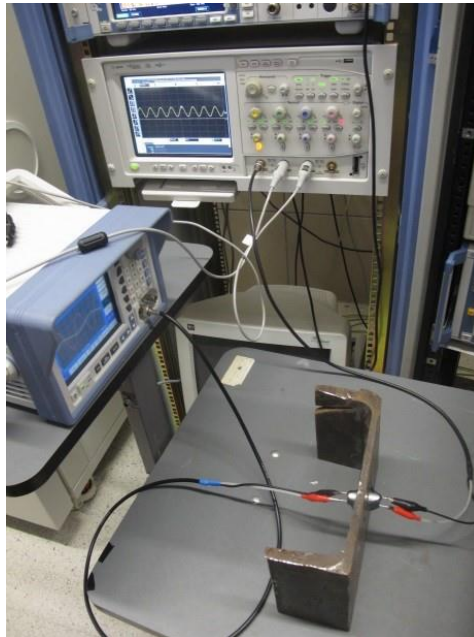


Figura 3 - 4. Caracterización de un transductor en laboratorio

Dicha caracterización estuvo basada principalmente en la medida en tensión de la señal recibida, midiendo la atenuación sufrida alrededor de la frecuencia nominal de cada uno de los transductores para determinar su ancho de banda.

De este modo, el par transmisor/receptor elegido fue el formado por los piezoeléctricos Prowave 400EP250 [3 - 22], con una frecuencia nominal centrada en 40 KHz, debido a que fue el que presentó menores pérdidas a través del metal, del orden de 7-8 dB. Dichos resultados en cuanto a atenuación fueron acordes a lo esperado, debido que esta frecuencia nominal de 40 KHz fue la mínima que se caracterizó.

En cuanto a su ancho de banda para una caída de 3 dB, este par de piezoeléctricos presentó unos 5 KHz, lo que resultó superior al proporcionado por las hojas de catálogo (igual a 2-2.5 KHz), también superior al presentado por los otros modelos caracterizados.

Dichos valores de frecuencia nominal y ancho de banda resultan suficientes debido a la baja tasa de transmisión requerida para esta aplicación. Así mismo, dichas frecuencias de operación favorecerán la implementación de la modulación a nivel software (es decir, en el propio microcontrolador, tal como se detallará en posteriores apartados), a partir del uso del DAC del propio microcontrolador (STM32F103RD del fabricante ST [3 - 24]), el cual tiene una tasa máxima de 1 MHz.

La caracterización experimental realizada en el laboratorio sobre el par basado en los transductores Prowave 400EP250 fue repetida en empleando como canal de comunicaciones la pared metálica de un contenedor real (Figura 3-11). Una conclusión adicional que pudo extraerse de este *set* de medidas es el hecho de que ambos transductores no necesitan estar exactamente enfrentados, lo cual facilitará su instalación en el sistema final, debido a que la disposición de ambos transductores no tendrá que ser milimétrica.



Figura 3 - 5. Caracterización experimental

3.2.2.2. Diseño de las etapas de adaptación

La cadena completa de la señal de ultrasonidos constará de las siguientes etapas:

- Generación de la señal analógica
- Buffer a la salida del DAC
- Transductor transmisor
- Transductor receptor
- Amplificador de carga
- Conversión a digital

El buffer a la salida del DAC (interior del contenedor) es utilizado para conseguir la máxima transferencia de potencia en la carga. Este componente es opcional ya que, según las hojas de catálogo, existe la opción de usar un buffer interno al microcontrolador, aunque no se especifica para qué rango de carga puede usarse.

En el lado receptor (exterior del contenedor), la señal acústica es recibida y convertida al dominio eléctrico por otro transductor piezoeléctrico del mismo modelo. Tras esto, dicha señal pasa por un amplificador de carga para conseguir una señal adaptada al fondo de escala del ADC.

En este caso, la etapa del amplificador de carga seleccionada es un integrador de carga que actúa como filtro paso alta (Figura 3 - 6), con capacidad de ajuste de la frecuencia de corte, y que tiene como entrada la salida en corriente del transductor, integrando dicha señal a partir del correspondiente lazo de realimentación del amplificador a través de la capacidad C_f y la resistencia R_f . De esta forma, se obtendrá el valor correspondiente en tensión amplificada.

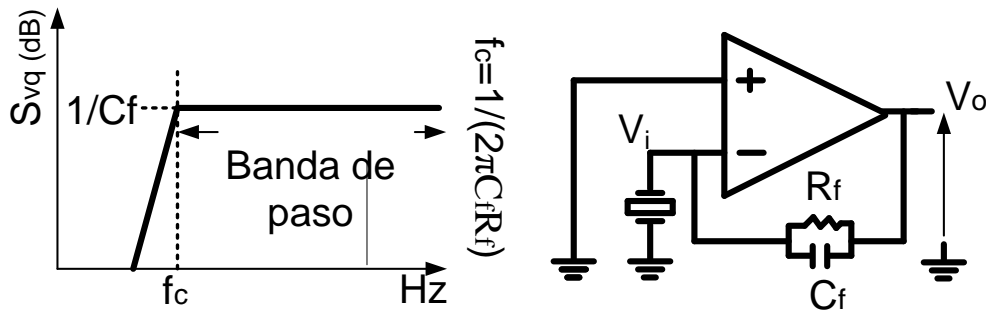


Figura 3 - 6. Filtro de reconstrucción

Los valores seleccionados para implementar esta etapa de amplificación de carga han sido $C_f = 10 \text{ pF}$ y $R_f = 400 \text{ K}\Omega$. En primer lugar, el valor de la capacidad se ha minimizado con el objetivo de maximizar la sensibilidad de dicha etapa, la cual es inversamente proporcional al valor de la capacidad. En segundo lugar se ha determinado el valor de $R_f = 400 \text{ K}\Omega$, atendiendo a la ecuación que determina la frecuencia de corte del filtro implementado ($f_c = 1/2\pi R_f C_f$), la cual debe ser suficientemente menor que 40 KHz , para emplazar la banda de interés dentro de la banda de paso del filtro. El amplificador utilizado fue el OPA350 del fabricante Texas Instruments.

3.2.2.3. Diseño de las etapas de modulación/demodulación

Debido al bajo requerimiento en cuanto a ancho de banda, se prevé que empleando una modulación DBPSK se podrán cubrir las especificaciones del sistema.

Este esquema de modulación está basado en el principio de transmitir una onda senoidal que sin cambio de fase significa la transmisión de un '1' lógico y con un cambio de fase (de 180° en el caso binario que se implementará) la transmisión de un '0' lógico. Dicha implementación supone un aumento en la distancia de los umbrales de decisión en la constelación y una minimización de la tasa de error de bit (BER). La Figura 3 - 7 muestra la idea de dicha modulación:

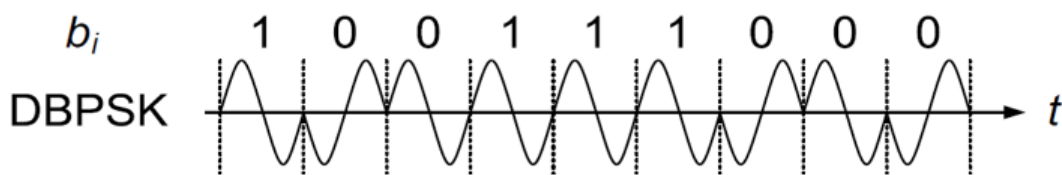


Figura 3 - 7. Modulación DBPSK

De este modo, las principales características que han motivado la elección de este tipo de modulación son las siguientes:

- Como el resto de modulaciones diferenciales, permite una demodulación no coherente, es decir, el receptor no necesita recuperar en sincronismo el reloj del transmisor, lo que facilita el proceso de recepción.
- Se trata de una modulación binaria, óptima para bajas tasas de transmisión.
- Al ser una modulación digital sencilla de implementar, se puede llevar a cabo en un microcontrolador sin altos requisitos de velocidad ni capacidad de cálculo, lo que evita emplear circuitos integrados (IC) externos que aumentarían la complejidad y el consumo del sistema.

En base a estos principios y a las características del microcontrolador seleccionado, dicha etapa de modulación se implementará como sigue:

- La frecuencia de portadora empleada es igual a 40 KHz, la cual es la frecuencia nominal del transductor seleccionado.
- El DAC trabajará a una tasa de muestreo igual a 640 KHz. Se ha elegido dicha frecuencia por ser la máxima permitida por el DAC que permite utilizar un número entero y múltiplo de 2 de la frecuencia de portadora (lo que ayudará a simplificar los procesos de modulación/demodulación), siendo la tasa máxima de muestreo del DAC igual a 1 MHz. De este modo, se estarán generando 16 muestras por cada ciclo de portadora, logrando la máxima precisión posible y optimizando la capacidad de cálculo por el hecho de ser múltiplo de 2 de la frecuencia portadora.
- Los valores de amplitud la senoide digital que servirá como entrada al DAC se almacenan en una LUT de tamaño 16x12, es decir, 16 palabras por periodo de 12 bits cada una, debido a que ésta es la resolución del DAC.
- De este modo, a partir de los bits de la trama que sirven como entrada a la LUT se indica la dirección en la que se recorre, es decir, una dirección para proporcionar a la salida de la LUT un seno con fase igual a 0°, cuando la entrada es un '1', y un seno con fase igual a 180°, para el caso de que la entrada sea un '0'.
- Debido a que el ancho de banda de transmisión será como máximo igual a 5 KHz, por cada tiempo de bit $T_b = 0.4$ ms ($f_b = 2.5$ Kbps) se transmitirán 16 ciclos de la portadora a 40 KHz. De este modo, por cada tiempo de bit se recorrerá 16 veces la LUT para ir proporcionando las diferentes entradas al DAC.

El esquema descrito, el cual trabaja a 640 KHz y emplea una tensión nominal de 3.3 V, permite implementar una transmisión fiable a partir de un sistema que minimiza el consumo de potencia, al no ser necesarias etapas externas de conversión digital-analógico ni amplificación.

Por otra parte, las principales características de la etapa de demodulación digital implementada son las siguientes:

- Existirá una secuencia de inicio (varias palabras de bits a '1') que indican el inicio de trama, durante un intervalo de tiempo que asegure que el receptor comienza a leerla en algún punto de ella y sin perder la información útil de la trama.
- Posteriormente se recibirá una palabra con todo a '0' que indica el inicio de trama.
- Las siguientes 16 palabras se almacenarán en una LUT de modo que se tenga memorizado un ciclo de referencia.
- Las siguientes 16 palabras se almacenarán temporalmente en una segunda LUT, de modo que ya se podrán comparar ambos ciclos con el objetivo de calcular la correlación entre ellos que indicará si ha habido cambio de fase o no.
- Debido al hecho de contar con 16 ciclos de portadora por cada tiempo de bit, es posible permitirse no detectar un cambio de fase, que indicaría la transmisión de un '0', ya que se detectaría en el siguiente ciclo de portadora, de modo que no se perdería la información. Así mismo, en el caso de que se haya detectado un segundo cambio de fase se considerará válido, y se procederá a almacenar la información de la segunda LUT en la primera para utilizarla como nueva referencia.

3.2.2.4. Aspectos de implementación

Tal y como se ha comentado previamente, el diseño del sistema de comunicaciones basado en ultrasonidos descrito en los apartados anteriores se implementará sobre el desarrollo llevado a cabo en el sistema CUTS, detallado en el Capítulo 2 de esta Tesis). No obstante, el sistema completo contará

con algunos cambios menores respecto al anterior, como es la sustitución de algunos sensores por otros análogos.

Los sensores utilizados en la presente implementación se listan a continuación, con sus principales características detalladas en la Tabla 3-1:

- Sensor de temperatura y humedad: CC2D33 de *Amphenol*.
- Sensor de luminosidad: MAX44000 de *Maxim Integrated*.
- Sensor magnético: HGDEST021B de *ALPS*.
- Sensor PIR (detección de movimiento): EKMB1203111 de *Panasonic*.
- Acelerómetro: LIS3DSHTR de *STMicroelectronics*.

	Corriente alimentación (μ A)	Precisión	Rango	Interfaz
C2D33	750	$\pm 2\%$ RH $\pm 0,3$ °C	0 - 100% RH -40 - 125 °C	I2C
MAX44000	5	0,03 Lux	0 - 65535 Lux	I2C
HGDEST021B	3	2 mT	-	GPIO
EKMB1203111	2	-	12 m	GPIO
LIS3DSHTR	11	0,06 mg/LSB (FS = ± 2 g)	± 2 g - ± 16 g	I2C

Tabla 3 - 1. Características de los sensores

La mayoría de estos sensores son monitorizados periódicamente debido a la propia naturaleza de las magnitudes que adquieren, como es el caso de la temperatura, la luminosidad o la humedad. Sin embargo, otros son monitorizados como consecuencia de eventos concretos, como pueden ser la detección de la apertura de las puertas del contenedor, de un fuerte golpe o de movimiento en el interior del mismo.

Estos datos, una vez son adquiridos por los sensores, son transmitidos al microcontrolador, que se encarga de procesarlos y transmitirlos a través de su DAC y del *front-end* de ultrasonidos, siguiendo la cadena detallada en los puntos 3.2.2.2 y 3.2.2.3.

El microcontrolador utilizado es un ARM Cortex-M3 de 32bits, la cual es una familia que se caracteriza por su muy bajo consumo y su alto rendimiento. En concreto, el modelo seleccionado es el STM32F103RD del fabricante STMicroelectronics, cuyas principales características son las siguientes:

	STM32F103RD
Corriente de alimentación (periféricos activos)	37 mA
Corriente de alimentación (Standby)	3 μ A
Reloj	Hasta 72 MHz
DAC	2 x 12 Bits
ADC	16 Canales x 12 Bits
Memoria Flash	384 KB
Memoria RAM	64 KB
Interfaces	2 x I2C, 3 x SPI, 2 x I2S, CAN, 3 x USART, 2 x UART, 8 x Timers (16bit)

Tabla 3 - 2. Características del Microcontrolador

También cabe destacar la selección de la envolvente *B 140804 ABS 7035* de fabricante *Bopla* para los nodos interior y exterior al contenedor, la cual cuenta con grado de protección IP 66/67 y unas dimensiones de 150 x 80 x 40 mm³, apropiadas para alojar los dispositivos en el corrugado de las paredes con el que cuentan la mayoría de los contenedores de mercancías, y poder así, además, implementar una comunicación con ambos transductores enfrentados uno respecto al otro.

Adicionalmente, en cuanto a la fijación del nodo completo a la pared del contenedor, se utilizaron imanes de neodimio BMN4-16, con capacidad para soportar 9.5 Kg). Si bien en los nodos los imanes eran externos para la sujeción de éstos, para el caso de los piezoeléctricos se integraron individualmente en una estructura fabricada con una impresora 3D.

Además, es importante comentar que, a nivel HW, el coste del dispositivo está en el rango de 200-300€, sin aplicar a este precio ninguna escalabilidad relativa a la fabricación de un gran número de nodos. Por tanto, en este sentido, se cumple uno de los requisitos fijados inicialmente, ya que el coste del dispositivo no es significativo respecto al coste del contenedor, o de la carga que éste transporta, la cual puede oscilar, a modo de ejemplo, desde los 10000€ y 40000€ para el transporte de frutas hasta los varios millones de euros en caso de transporte de material farmacéutico [3 - 23].

Por otro lado, aunque no es objetivo del alcance de esta Tesis y con el propósito de situar el desarrollo realizado en un marco de trabajo completamente contextualizado, es necesario comentar que el sistema desarrollado se apoya sobre una algunos desarrollos de terceros. Estos desarrollos constarían de una red inalámbrica IEEE 802.15.4 en la banda de los 868 MHz, desarrollada por ADEVICE Solutions, un motor web que analiza y presenta los resultados, desarrollado por Guadaltel S.A., y unos algoritmos logísticos diseñados por el Grupo de Ingeniería de Organización de la Universidad de Sevilla.

Una vez que se han detallado los aspectos de implementación HW y SW que permiten la transmisión de información desde el interior de los contenedores al exterior, es necesario comentar cómo se codifica dicha información, lo cual se hace a continuación.

3.2.2.4.1. Entramado de comunicación por ultrasonidos

Para la transmisión de información entre ambos bloques se ha definido una trama que contiene campos de información que se podrían agrupar en tres grupos según su funcionalidad. Antes de definirlos, se muestra una ilustración para un mejor entendimiento:



Figura 3 - 8. Trama de información

La trama mostrada en la Figura 3 - 8 cuenta con los siguientes campos:

- **Campos de control (Inicio, CRC y Fin de Trama):** estos campos hacen referencia a bytes de información que permitirán delimitar el inicio y el final de una trama. Además, se incluirá un campo de CRC (Código de Redundancia Cíclica) para detectar errores en los datos durante la transmisión. El tamaño de los campos de control es el siguiente:
 - Inicio de trama: 1 byte
 - **CRC:** 1 byte
 - Fin de trama: 1 byte
- **Campos de medidas:** se refiere a los datos propios obtenidos de los sensores, tales como temperatura, humedad, aceleración, etc. El tamaño de los campos de medidas es el siguiente:
 - Fecha: 5 bytes
 - Hora: 3 bytes
 - Puerta: 1 byte
 - Movimiento: 1 byte
 - Aceleración: 12 bytes
 - Luminosidad: 4 bytes
 - Temperatura: 4 bytes
 - Humedad: 4 bytes

Fecha	Hora	Puerta	Movimiento	Aceleración	Luminosidad	Temperatura	Humedad
-------	------	--------	------------	-------------	-------------	-------------	---------

Figura 3 - 9. Campos de Medida

- **Campos de alarmas:** son tres campos con los que se pretende proporcionar información acerca del evento que produjo la toma de datos de los sensores. En concreto, existirá un campo para indicar si el sensor que originó la toma de medidas fue el sensor de movimiento, si fue el de control de apertura y cierre de puertas (sensor magnético), o si fue el acelerómetro (caída libre). El tamaño de los campos de alarmas es el siguiente:
 - Alarma puerta: 1 byte
 - Alarma movimiento: 1 byte
 - Alarma caída libre: 1 byte

Alarma Puerta	Alarma Movimiento	Alarma Caída Libre
---------------	-------------------	--------------------

Figura 3 - 10. Campos de Alarmas

De esta manera, la comunicación entre microcontroladores tiene delimitado el inicio y fin de transmisión, además de analizar un posible fallo en los datos al ser enviados. Además, el hecho de

incluir en la trama los datos de fecha y hora permite al usuario identificar en qué momento fueron tomadas las medidas por los sensores.

Tras detallar el detalle de los distintos aspectos de implementación, se muestran los resultados obtenidos por dicha implementación.

3.2.3. Resultados experimentales

Con el objetivo de validar los desarrollos realizados se realizan varias baterías de pruebas en las que se caracterizarán de forma experimental el rendimiento del sistema. No obstante, por lo complejo del montaje de pruebas y los equipos de instrumentación implicados en el mismo, estas pruebas se realizaron en una plancha metálica de dimensiones $1 \times 1 \times 0.01 \text{ m}^3$ como emulador de un contenedor de mercancías y siguiendo los esquemas de implementación anteriormente definidos (se utiliza el amplificador de carga OPA350 del fabricante Texas Instruments). Cabe destacar que el espesor de la estructura que emula a la pared del contenedor de carga (1 cm) es superior al de la mayoría de los contenedores existentes (entre 5 y 7 mm), por lo que los resultados obtenidos se pueden considerar conservadores.

Como resultado principal se observa que, excitando al transductor transmisor con una tensión de $3.3 V_{pp}$ (lo que equivale a un consumo de 36.3 mW), el valor de la tensión de salida (transductor receptor) es de 12 mV_{pp} . Así mismo, se observó un ancho de banda de 10 KHz, el cual resulta suficiente para la tasa de datos requerida de 2.5 Kbps. Dichos resultados experimentales fueron publicados en [3-21].

Para ubicar estos resultados en el estado del arte, éstos son comparados con los arrojados por otras implementaciones existentes basadas en la comunicación por ultrasonidos sobre canal metálico. La comparativa de las características principales de dichos trabajos de investigación se recoge en la Tabla 3-3.

Public.	Tasa de datos (Kbps)	Modulación	Tensión/Potencia de Entrada	Espesor de la pared (cm)
[3 - 7]	0,435	AM	10 V	15,24
[3 - 8]	1	AM	30 mW	0,7
[3 - 17]	1000	QPSK	1230 mW	2,54
[3 - 25]	15000	OFDM	-	6,35
[3 - 26]	17370	OFDM	31 V	6,35
Este desarrollo [3 - 21]	5	DBPSK	3,3 / 36,3 mW	1

Tabla 3 - 3. Comparativa con otros trabajos relacionados

Cabe destacar que todos los trabajos de esta comparativa usan tecnología basada en piezoeléctricos, salvo la publicación [3 - 7], que utiliza la tecnología EMAT en su lugar. En lo que a la tasa de datos se refiere, tanto en [3 - 25] como en [3 - 26] se obtienen valores superiores a los obtenidos por la solución propuesta, lo que es debido, principalmente, al uso de modulaciones más complejas, como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), y que, por tanto, suponen un mayor consumo de energía

del sistema completo. Por otro lado, en el caso de los sistemas orientados a aplicaciones de bajo consumo y baja tasa de datos, tan solo [3 - 8] presenta un consumo del mismo orden al del sistema propuesto, aunque, en este caso, se utiliza un canal metálico más fino.

Finalmente, con el objetivo de validar el sistema completo, se realizaron tres baterías de pruebas en las que monitorizaron simultáneamente hasta tres contenedores completamente equipados (es decir, con un nodo interior, un nodo exterior y la red de comunicaciones). Los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 3-4 [3 - 21].

<i>Test Bench</i>	Medidas periódicas	Medidas periódicas correctas (%)	Eventos detectados	Eventos detectados (%)	Medidas totales	Medidas correctas (%)
1	62	98,38	20	100	82	98,78
2	67	98,51	81	97,53	148	97,97
3	300	98	973	97,12	1273	97,33

Tabla 3 - 4. Resultados experimentales del sistema completo

En la Tabla 3 - 4 se detallan los resultados de cada uno de los *test-benches* realizados. De este modo, se realizaron medidas, tanto periódicas como controladas por eventos, oscilando la suma de éstas entre 82 en el menor de los casos y 1273 en el mayor de ellos. En todos los casos la tasa de medidas correctas, transmitidas a través del canal de ultrasonidos y posteriormente por la red inalámbrica de bajo consumo, estuvo por encima del 97.33%. Esto es un dato muy prometedor a la hora de pensar en el despliegue del sistema diseñado para la monitorización de un mayor número de contenedores de carga en el marco de la aplicación IoT propuesta. En la Figura 3 - 11 se muestra un ejemplo del emplazamiento de los nodos.



Figura 3 - 11. Instalación en el interior (Izda..) y exterior (Dcha.) del contenedor.

Por último, en las siguientes figuras se muestran una serie capturas de la interfaz web que explota la información proporcionada por los nodos desarrollados para ofrecer los distintos servicios a los usuarios.

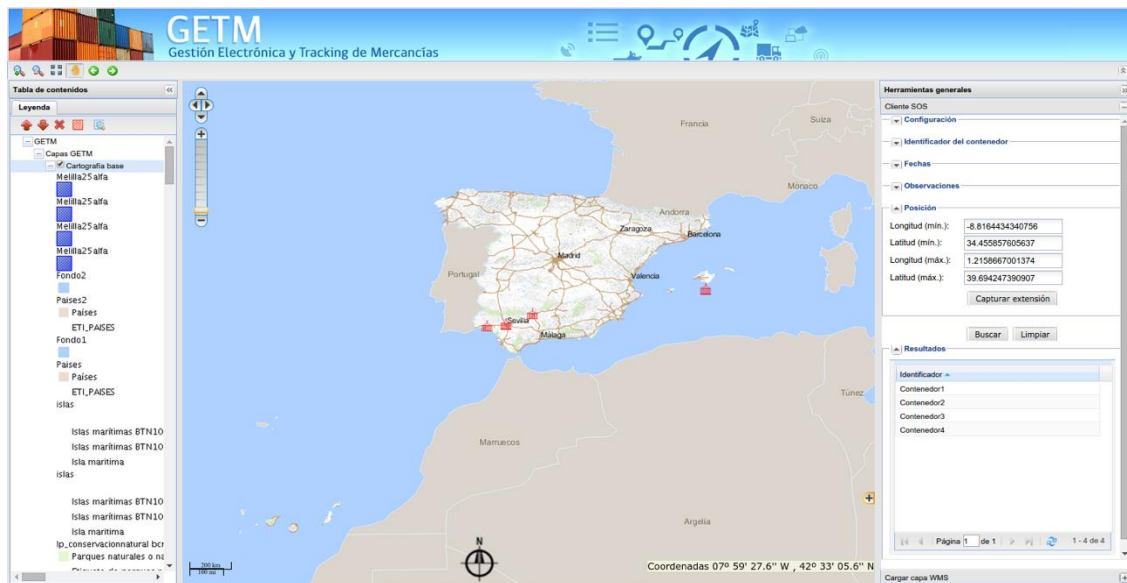


Figura 3 - 12. Vista general de la interfaz web del sistema GETM

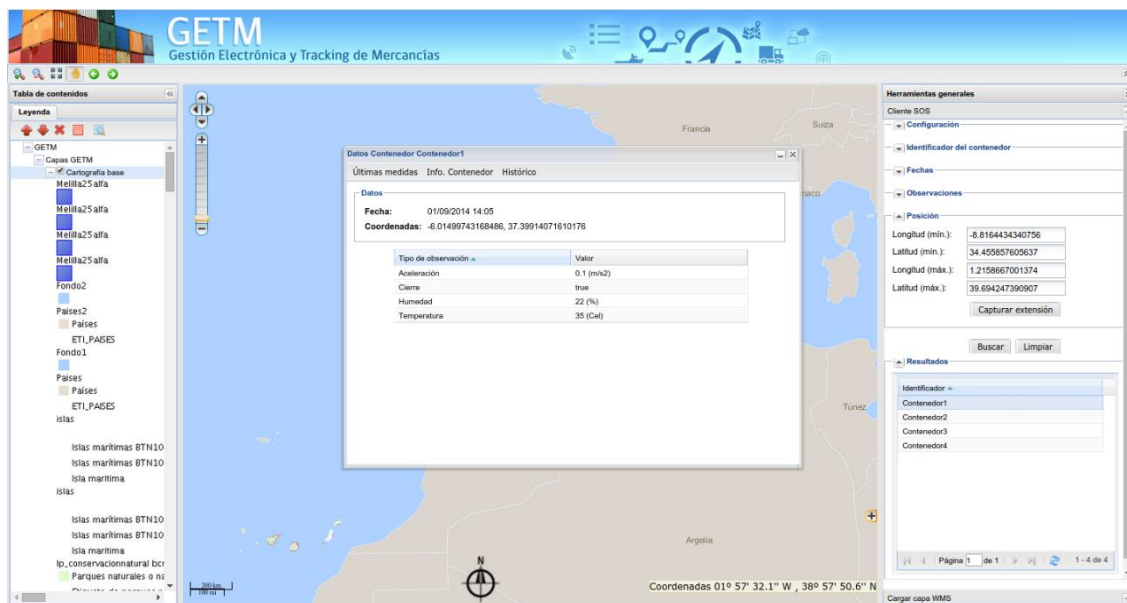
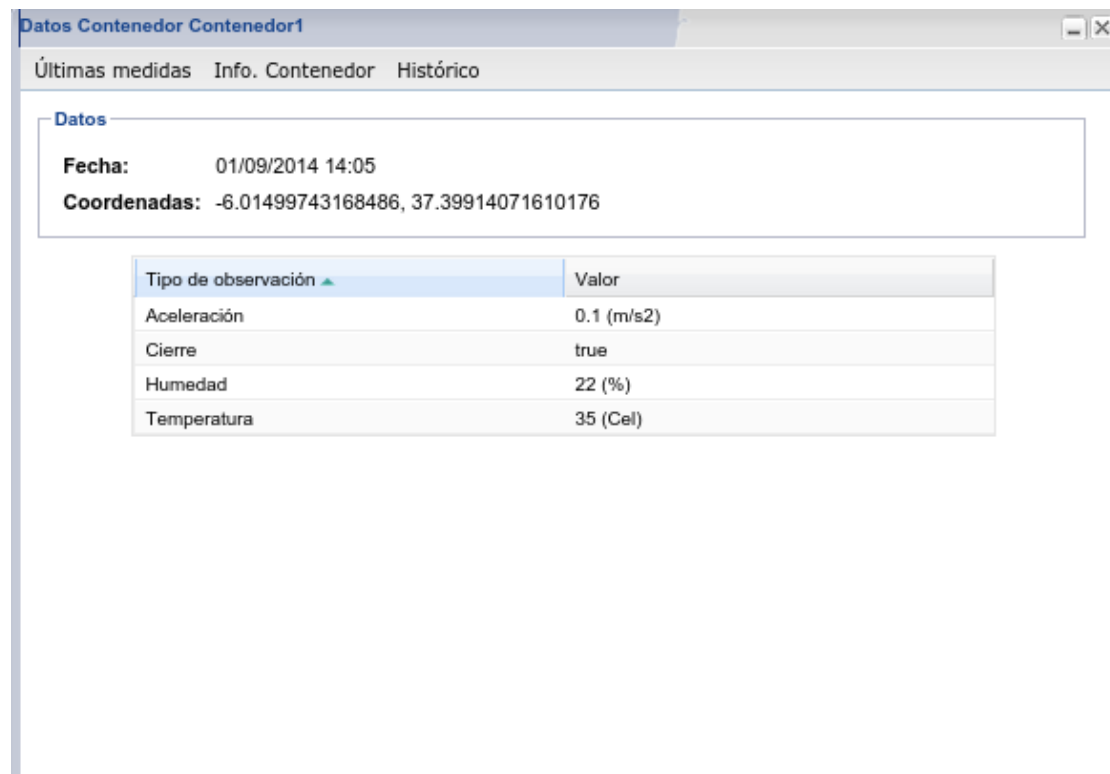


Figura 3 - 13. Vista de la gestión del Contenedor 1

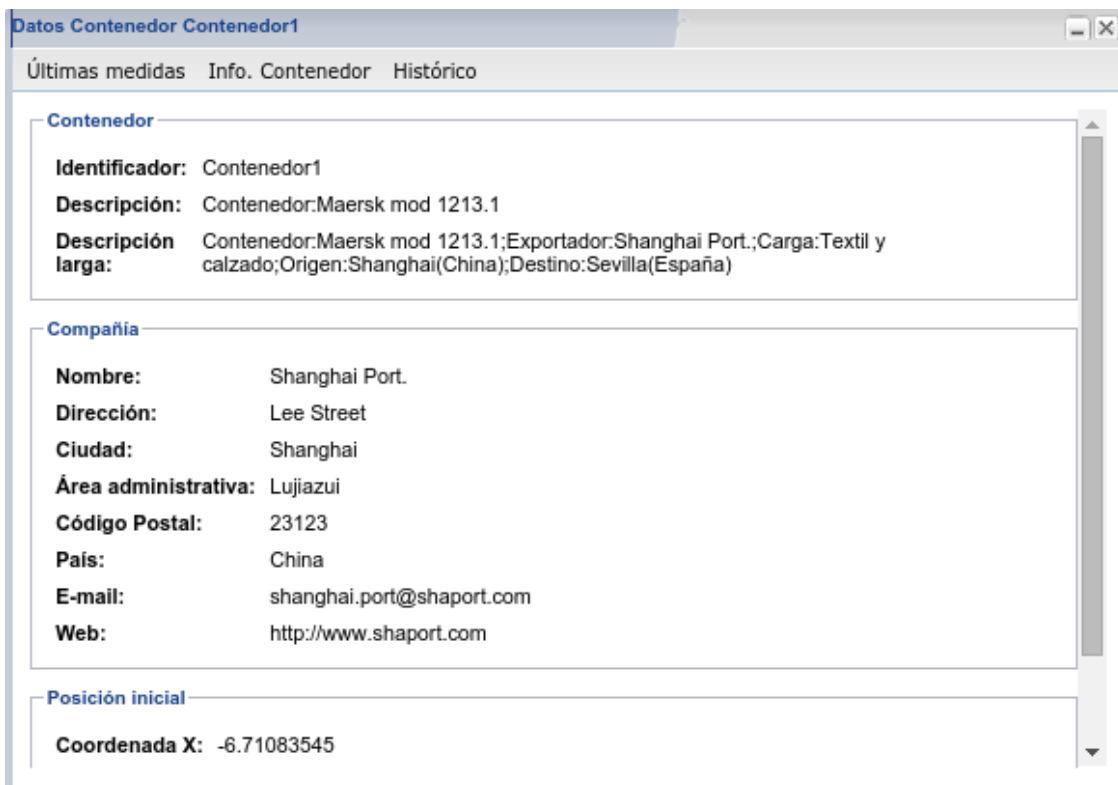


The screenshot shows a web application window titled "Datos Contenedor Contenedor1". It has three tabs: "Últimas medidas", "Info. Contenedor", and "Histórico". The "Últimas medidas" tab is active, displaying a "Datos" section with the following information:

Fecha: 01/09/2014 14:05
Coordenadas: -6.01499743168486, 37.39914071610176

Tipo de observación ▲	Valor
Aceleración	0.1 (m/s2)
Cierre	true
Humedad	22 (%)
Temperatura	35 (Cel)

Figura 3 - 14. Detalle de los valores tomados para el Contenedor 1



The screenshot shows the same web application window, but with the "Info. Contenedor" tab active. It displays detailed information about the container, organized into three sections:

Contenedor

Identificador: Contenedor1
Descripción: Contenedor:Maersk mod 1213.1
Descripción larga: Contenedor:Maersk mod 1213.1;Exportador:Shanghai Port.;Carga:Textil y calzado;Origen:Shanghai(China);Destino:Sevilla(España)

Compañía

Nombre: Shanghai Port.
Dirección: Lee Street
Ciudad: Shanghai
Área administrativa: Lujiazui
Código Postal: 23123
País: China
E-mail: shanghai.port@shaport.com
Web: http://www.shaport.com

Posición inicial

Coordenada X: -6.71083545

Figura 3 - 15. Información de identificación del Contenedor 1

Datos Contenedor Contenedor1

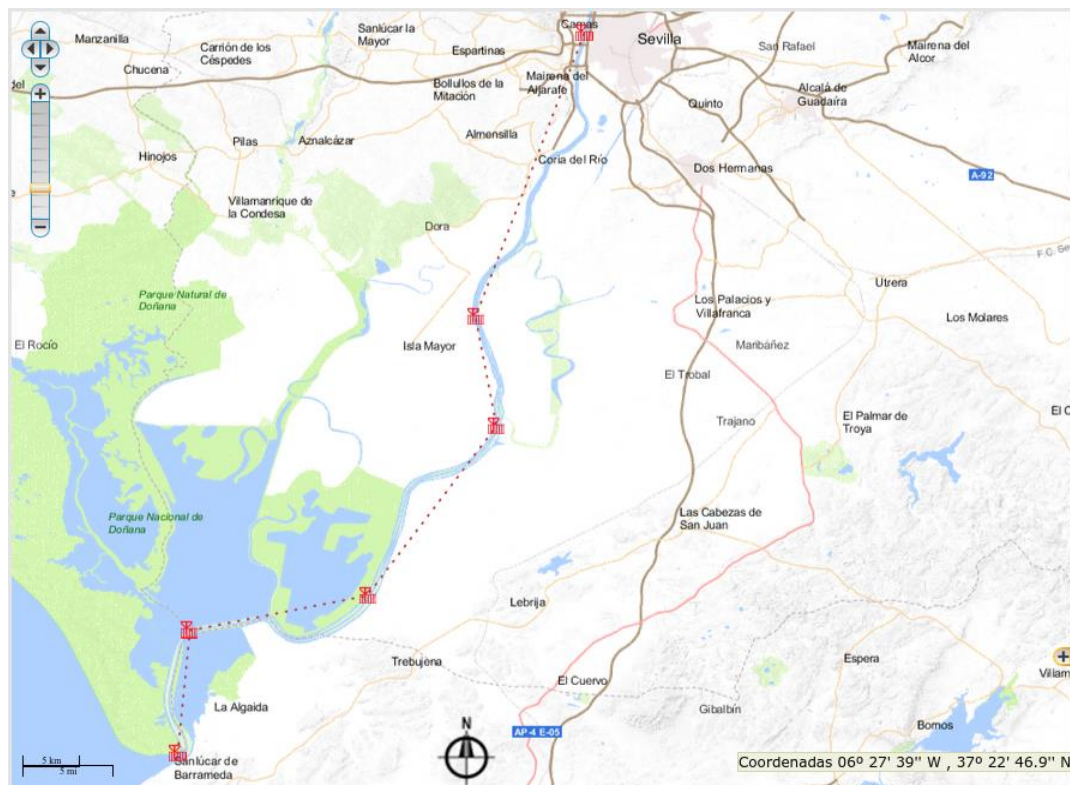
Últimas medidas Info. Contenedor Histórico

Filtrado de observaciones

F. inicial: Hora : Min
F. fin: Hora : Min

Tipo de observación	Valor	Fecha	Coordenadas
Cierre	true	01/09/2014 14:05	-6.01499743168486, 37.39914071610176
Aceleración	0.1 (m/s2)	01/09/2014 14:05	-6.01499743168486, 37.39914071610176
Temperatura	35 (Cel)	01/09/2014 14:05	-6.01499743168486, 37.39914071610176
Humedad	22 (%)	01/09/2014 14:05	-6.01499743168486, 37.39914071610176
Temperatura	26 (Cel)	01/09/2014 13:05	-6.103921076690567, 37.162448944085135
Cierre	false	01/09/2014 13:05	-6.103921076690567, 37.162448944085135
Aceleración	0.2 (m/s2)	01/09/2014 13:05	-6.103921076690567, 37.162448944085135
Humedad	19 (%)	01/09/2014 13:05	-6.103921076690567, 37.162448944085135

Figura 3 - 16. Histórico de medidas del Contenedor 1

Figura 3 - 17. Tracking y servicio de Geofencing⁷ del Contenedor 1

⁷ Seguimiento de un dispositivo dentro de un área virtual

3.2.4. Conclusiones

El sistema presentado en este apartado propone una solución a las necesidades detectadas en el estado del arte de los sistemas previos de monitorización de carga, en los que el establecimiento de una comunicación inalámbrica entre el interior y el exterior de los contenedores de mercancías supone un reto no resuelto.

Con esta motivación, el sistema propuesto proporciona una interfaz inalámbrica, basada en ultrasonidos, capaz de transmitir datos entre el interior y el exterior de los contenedores sin necesidad de realizar taladros ni otras acciones invasivas. Además, tampoco implica complejas instalaciones más allá de la fijación del dispositivo con imanes a las paredes de estos contenedores.

A nivel de implementación se ha seleccionado una modulación tipo DBPSK por su robustez y su simplicidad, además de posibilitar una demodulación no coherente.

En cuanto a los resultados experimentales obtenidos, especialmente los referidos a consumo, el diseño propuesto se sitúa en el estado del arte de los sistemas basados en comunicación por ultrasonidos en canal metálico. Así mismo, las pruebas de campo arrojaron resultados muy positivos, mostrando que el sistema es muy fiable en lo que a comunicaciones se refiere, obteniendo una tasa de transmisiones correctas por encima del 97.33%.

No obstante, aunque se trata de un avance significativo y una primera solución a los retos tecnológicos planteados, no supone una solución definitiva en tanto que, al tratarse de un sistema orientado a aplicaciones de bajo consumo, será siempre mejorable en este aspecto. De este modo, dicha optimización abre dos vías diferentes para nuevos desarrollos: por un lado, es posible minimizar el consumo de energía optimizando el diseño en cada una de sus partes (como pueden ser las etapas de adaptación de señal o las de modulación/demodulación) y, por otro lado, explotando las características del propio canal metálico para disminuir el consumo y, además, mejorar las prestaciones del sistema en cuanto a ancho de banda disponible. Estas dos vías de investigación para la optimización del sistema serán evaluadas y desarrolladas en los siguientes puntos.

3.3. Diseño de un sistema de monitorización no invasivo para el transporte de mercancías en contenedores optimizado en consumo

En este punto se propone el diseño de una actualización sobre el sistema desarrollado en 3.2 en el que se optimice el rendimiento del mismo en términos de consumo de energía. Para ello, sobre el diseño anterior se realizarán una serie de modificaciones tales como el diseño de un nuevo método de fijación de los piezoelectricos a los contenedores o un análisis experimental de distintos esquemas de modulación para determinar el óptimo. Finalmente, sobre el esquema seleccionado se propondrá un esquema de bajo consumo y bajo coste con el objetivo de obtener una solución desplegable en el marco IoT.

Este diseño se realizó en el marco del proyecto ECOTRANSIT (TEC2013-47286-C3-1-R), financiado por el Plan Estatal 2013-2016 Retos – Proyectos I+D+i, el cual se llevó a cabo en colaboración con la Universidad Pública de Navarra. Así mismo, los resultados de dicho diseño dieron origen a las publicaciones [3 - 27][3 - 33].

3.3.1. Mejora del soporte y caracterización del canal

Como se comentó en el capítulo anterior, uno de los factores que tiene mayor impacto sobre el rendimiento del sistema es la fijación de los transductores al canal metálico. Una fijación poco robusta, o que pueda verse afectada por el movimiento o las vibraciones, provocará que la transmisión de

información no sea fiable. Por este motivo, en este apartado se describen algunos mecanismos para optimizar la fijación del transductor al contenedor.

Existen fundamentalmente dos tipos de fijación para los transductores: instalaciones permanentes a partir del uso de resinas de tipo epoxi, o temporales a partir del uso de elementos magnéticos como son los imanes de neodimio descritos en la implementación anterior. Las fijaciones permanentes cuentan con el inconveniente de requerir la aplicación de productos químicos que necesitan un tiempo de secado y, además, los transductores pueden resultar dañados en el caso de querer retirarlos de los contenedores. Por el contrario, las fijaciones magnéticas permiten una instalación más sencilla y limpia, además de no afectar a la integridad de los transductores. No obstante, la utilización de este tipo de fijaciones puede dificultar una transmisión eficiente de la señal de comunicación, debido a las irregularidades que presentan las paredes metálicas o por falta de presión suficiente entre el transductor y la pared del contenedor.

Por este motivo, uno de los desafíos que se presentan en este capítulo es el diseño de una envolvente magnética para optimizar la transmisión de señal entre ambos transductores.

Esta envolvente ha sido fabricada en material ABS empleando una impresora 3D. Contiene en su interior tanto el transductor piezoeléctrico (modelo Prowave 400EP250) como 8 imanes atornillados, los cuales permiten ajustar su altura para generar una presión homogénea en toda la envolvente. Además, la envolvente contiene una tapa que sirve como medio de fijación para los imanes roscados y para el propio transductor. En la Figura 3 - 18 y la Figura 3 - 19 [3 - 33] se pueden apreciar estos desarrollos.

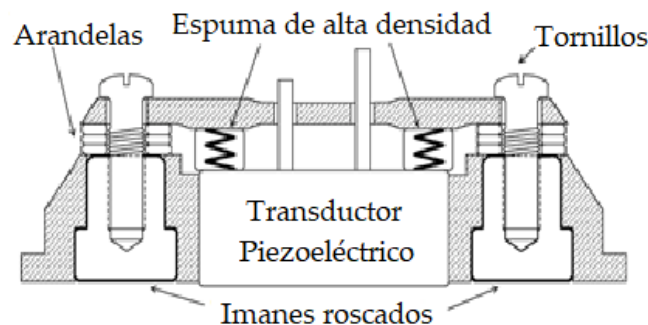


Figura 3 - 18. Esquema del soporte magnético para el transductor piezoeléctrico



Figura 3 - 19. Soporte magnético fabricado

Una vez que se cuenta con una carcasa suficientemente adaptada a las necesidades de la aplicación, se pasó a realizar la caracterización del canal de comunicaciones. En este caso, el amplificador de carga seleccionado es una versión actualizada del utilizado en el sistema anterior, el cual se muestra en la

Figura 3 - 20 [3 - 33] junto con el resto del *set-up* empleado para la caracterización del canal. Además, se ha añadido un amplificador de transimpedancia para la medida de la corriente de entrada al transductor transmisor, con el objetivo de caracterizar también el consumo de energía.

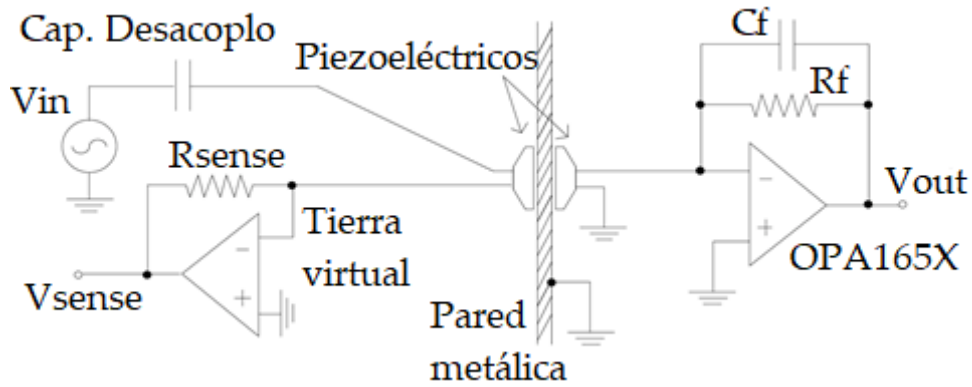


Figura 3 - 20. Set-up utilizado para la caracterización del canal

Cabe destacar que la plancha metálica (de dimensiones $50 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$), que emula a la pared del contenedor, es conectada a tierra para evitar acoplamientos eléctricos, de modo que solamente se transmita la comunicación acústica.

A partir de dicho *set-up* de medidas se realizó una caracterización espectral del canal, cuyos resultados se ilustran en la Figura 3-22 [3 - 33]:

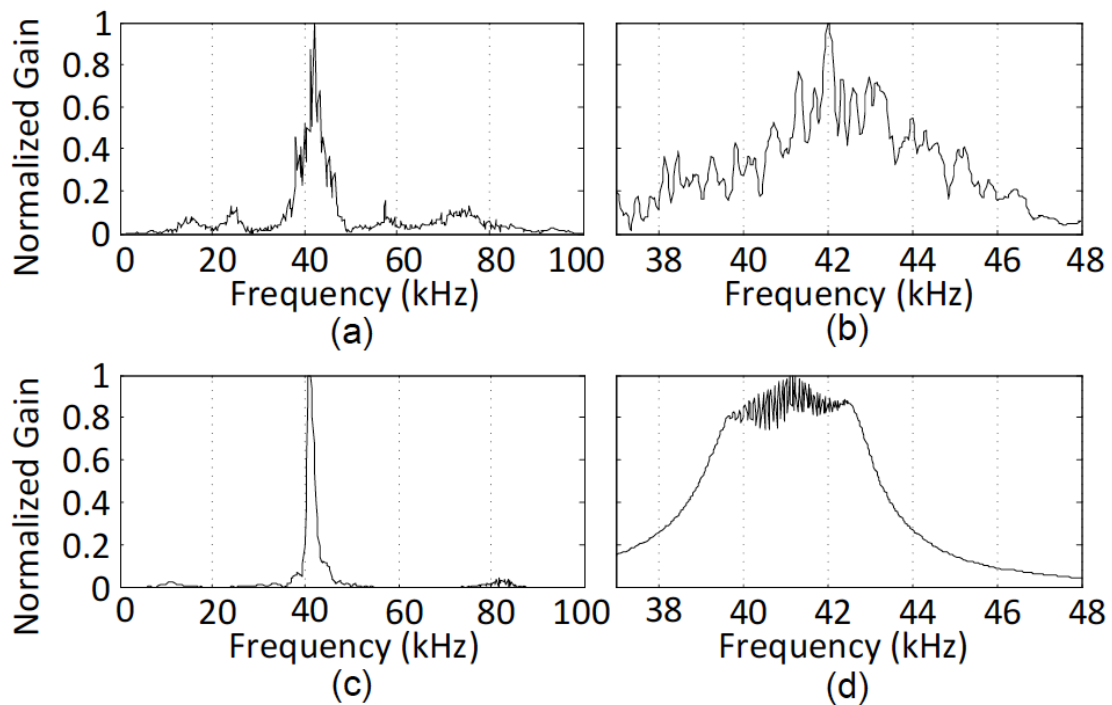


Figura 3 - 21. Respuesta en frecuencia normalizada: (a) Transductores fijados con los soportes magnéticos, (b) Detalle del rango de frecuencias de interés de (a), (c) Transductores colocados directamente uno frente al otro, y (d) Detalle del rango de frecuencias de interés de (c)

En las figuras anteriores se puede apreciar cómo la banda de interés cuenta con un número elevado de picos y valles separados por centenas de Hertzios. Dichas irregularidades en la respuesta en

frecuencia dependerán de la propia instalación de los nodos transmisor y receptor en el contenedor, por lo que en apartados posteriores se describirá un sistema de *tracking* de frecuencias con el objetivo de trabajar en la frecuencia de máxima ganancia en cada caso.

Así mismo, para caracterizar la respuesta en frecuencia de forma estadística, ambos transductores fueron ubicados en diferentes puntos de la placa metálica y monitorizados hasta 100 veces. Los resultados obtenidos reflejaron cómo la frecuencia de máxima ganancia oscila entre 38 KHz y 48 KHz, estando entre 41 KHz y 45 KHz en más del 75% de los casos.

3.3.2. Diseño y caracterización de distintos esquemas de modulación

En este apartado se describe el estudio que permite elegir la modulación más adecuada, a partir del análisis detallado de varios esquemas diferentes. Las modulaciones estudiadas están todas basadas en esquemas básicos, debido a las necesidades que presenta el sistema completo, en cuanto a la baja tasa de datos requerida y en cuanto a la minimización del consumo de energía.

De este modo, se compararon cuatro modulaciones distintas, todas ellas puramente digitales. En la Figura 3-23 [3 - 33] se ilustran las formas de onda, y su significado a nivel lógico, de cada una de las modulaciones estudiadas.

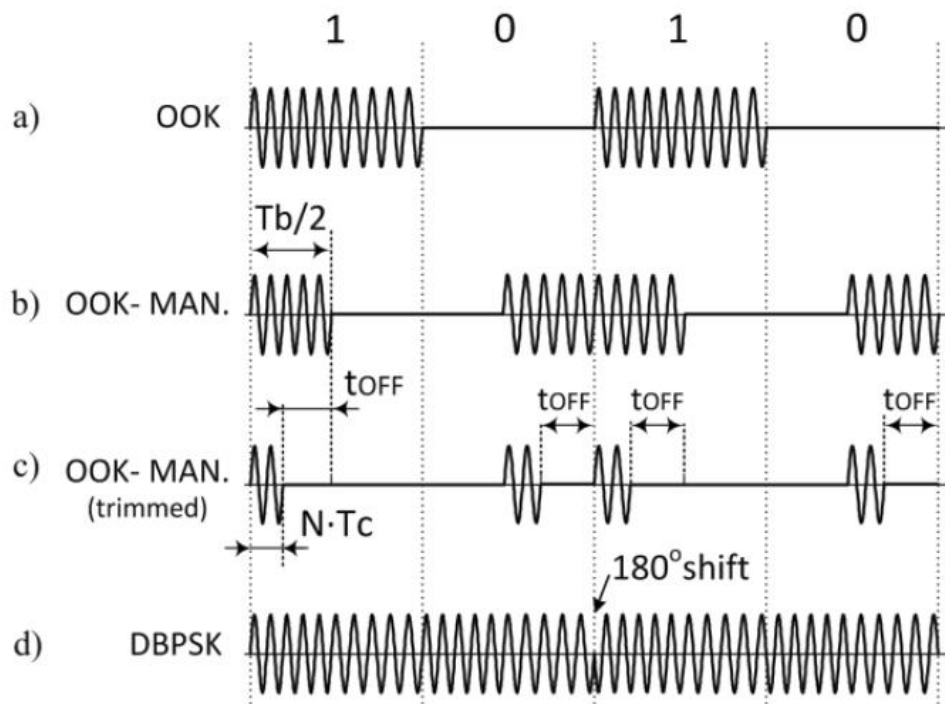


Figura 3 - 22. Formas de onda de las modulaciones estudiadas

3.3.2.1. Modulación OOK (On – Off Keying) con umbral estático

Se trata de una modulación digital en amplitud muy simple que consiste en la transmisión de la portadora durante un tiempo de bit (T_b) cuando el bit transmitido es '1' y en la ausencia de la misma cuando el bit transmitido es '0'.

El esquema de demodulación implementado es el mostrado en la Figura 3 - 23 [3 - 33].

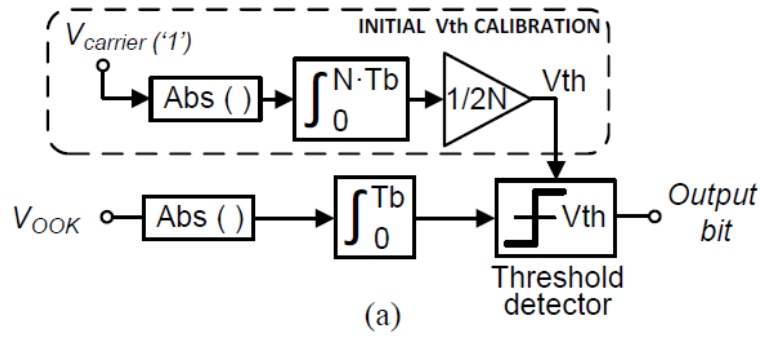


Figura 3 - 23. Esquema de demodulación OOK con umbral estático

Se trata de una modulación con portadora senoidal multiplicada por una señal NRZ (*Non-Return-to-Zero*) unipolar (Figura 3 - 22(a)), por lo que la densidad espectral de potencia se expresa como:

$$P_{OOK}(f) = \frac{A_c^2}{2} \left[\delta(f) + T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \right] \quad (3 - 1)$$

Donde A_c es la amplitud de la portadora y T_b es el tiempo de bit.

Inicialmente, para el establecimiento del umbral (V_{th}) con el que decidirá si el bit recibido es un '0' o un '1', el transmisor transmitirá durante N tiempos de bit ($N \cdot T_b$), en nuestro caso $N = 16$. Posteriormente, los valores recibidos son integrados como valores absolutos de señal durante cada tiempo de bit y comparados con el V_{th} anteriormente calculado para determinar el nivel lógico.

3.3.2.2. Modulación OOK (*On-Off Keying*) con codificación Manchester

En este caso se propone de nuevo una modulación digital de amplitud, pero con una codificación distinta a la anterior ya que, en este caso, se utilizará codificación Manchester, con el objetivo de mejorar la robustez frente a posibles variaciones del canal.

Esta codificación es muy simple y consiste en transmitir la primera mitad del T_b a nivel alto y la segunda mitad a nivel bajo si lo que se transmite es un '1', y el caso opuesto en caso de transmitir un '0' (Figura 3 - 22 (b)).

El esquema de demodulación para este caso (Figura 3 - 23) [3 - 33] es similar al anterior,() con la salvedad de que en este caso no es necesario contar con un valor umbral estático, así como que hay que implementar un retraso de la señal de valor $T_b/2$, lo cual se realizará en el dominio digital, almacenando el número de muestras correspondientes al tiempo de retraso deseado.

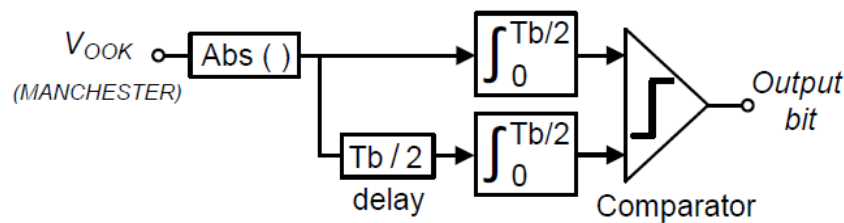


Figura 3 - 24. Esquema de demodulación de OOK con codificación Manchester

Aunque este esquema es muy similar al anterior, presenta una ventaja significativa, derivada de la eliminación del valor V_{th} estático. Por tanto, el esquema basado en codificación Manchester aporta mayor robustez para los casos en los que se produzcan variaciones del canal, ya que el valor V_{th} estático tomado durante el proceso de calibración del esquema anterior puede no responder al estado actual del canal de comunicaciones para estos casos.

3.3.2.3. Modulación OOK (On-Off Keying) con codificación Manchester y Posición de Pulso (PPM)

Se trata de una modulación en la que el ancho y la amplitud del pulso son fijas, mientras que la posición de estos pulsos es variable. En este caso, cuando el bit transmitido es un '1', se fija la transmisión de 10 periodos de la portadora al comienzo del tiempo de bit, y para el caso de transmisión de un '0', los periodos son transmitidos a partir de $T_b/2$ (Figura 3 - 22(c)).

El esquema de demodulación ilustrado en la Figura 3 - 25 [3 - 33] muestra cómo el valor absoluto de 8 muestras es almacenado en un registro de 8 bits y promediado, implementando digitalmente un filtro paso bajo. Dicho proceso se lleva a cabo dos veces por tiempo de bit: en $n \cdot T_b + 10T_c$ y en $n \cdot T_b/2 + 10T_c$. Al final del periodo de transmisión, ambos valores se compararán para determinar qué valor fue transmitido. Se trata, de nuevo, de una modulación no-coherente.

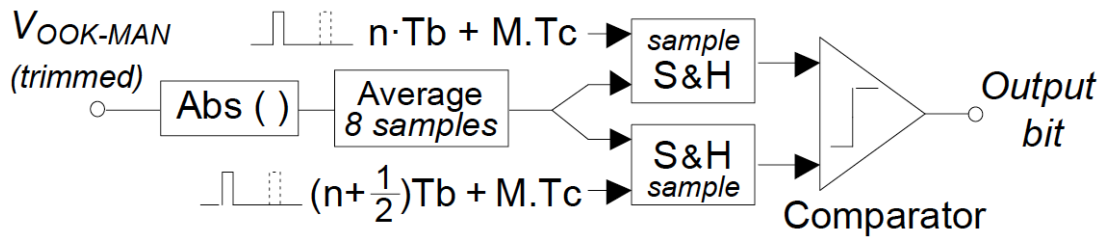


Figura 3 - 25. Esquema de demodulación PPM

3.3.2.4. Modulación DBPSK (Modulación por desplazamiento de fase)

Se trata de una modulación no-coherente, lo cual simplifica enormemente el esquema del demodulador, ilustrado en la Figura 3 - 26 [3 - 33]. Dicha modulación está basada en un cambio de fase de 180° respecto al bit anterior cuando el valor transmitido es un '1' y, por el contrario, no existe cambio en la fase de la señal cuando el dato transmitido es un '0' (Figura 3 - 22(d)).

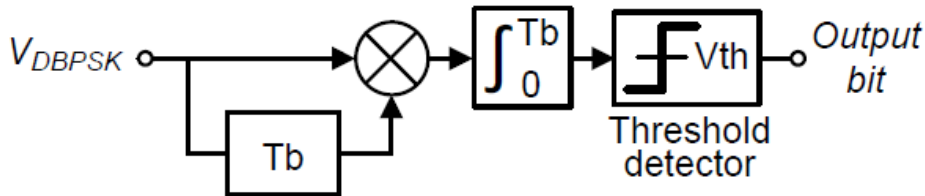


Figura 3 - 26. Esquema de demodulación de DBPSK

Si bien el hecho de que sea una modulación no-coherente implica un esquema de demodulación más sencillo, al no necesitarse ningún tipo de sincronía entre los relojes del transmisor y el receptor, computacionalmente resulta algo más costoso que los esquemas anteriormente descritos, debido a que es necesario almacenar dos símbolos consecutivos y hallar su correlación.

3.3.2.5. Comparativa de modulaciones

Para evaluar la robustez y el rendimiento de los esquemas de modulación presentados en los puntos anteriores, dichos esquemas se implementaron físicamente para realizar un análisis en cuanto a BER. Para ello se generó, como paquete de datos a transmitir, una sucesión de 1000 bits pseudo-aleatorios (con una cabecera de 16 bits), el cual se transmite 5000 veces, es decir, 5 Mbit. Para la generación y la recepción de los datos, se utilizó una FPGA Spartan 3 AN, empleando sus respectivos DAC y ADC para realizar la conversión en transmisión y recepción.

Con el fin de caracterizar el rendimiento del sistema de transmisión para un canal dado en unas condiciones más cercanas a un entorno real de funcionamiento, los test experimentales se realizaron aplicando dos efectos parásitos diferentes al canal de transmisión:

- Por un lado, se implementó un canal de transmisión excitado mecánicamente para emular las vibraciones en el contenedor.
- Por otro lado, se implementó un canal de transmisión excitado eléctricamente para emular posibles parásitos eléctricos sobre la superficie del contenedor que puedan acoplarse a la señal de interés.

En ambos casos la amplitud de la señal generada fue de $100mV_{pp}$ y la tasa de datos utilizada de 1 Kbps, la cual es inferior a la tasa máxima permitida por cada uno de los esquemas de modulación anteriores.

3.3.2.5.1. Estudio de BER bajo excitación mecánica

Para implementar la excitación eléctrica sobre la plancha metálica que emula la pared del contenedor se ha utilizado un vibrador Pasco modelo SF-9324 [3 - 34], el cual tiene capacidad para la generación de perturbaciones mecánicas, tanto para diferentes rangos de amplitud (en función de la amplitud de la señal eléctrica de entrada) como de frecuencia (hasta 5 KHz).



Figura 3 - 27. Vibrador mecánico Pasco SF-9324

En este caso se han realizado dos tipos de medidas distintas. Por un lado, se han realizado test en los que la frecuencia es similar a la que excita a los contenedores durante las travesías marítimas y el transporte terrestre (entre 1Hz y 1 KHz [3 - 35]) y, por otro lado, se aplican pulsos rectangulares de 5 ms de duración y frecuencia de 4 Hz que emulan posibles golpes sobre los contenedores.

Al mismo tiempo, la plancha metálica ha sido conectada a tierra con el objetivo de que el generador mecánico sea la única excitación existente sobre ésta.

Tal y como se puede apreciar en las Tabla 3 - 5 y Tabla 3 - 6 [3 - 33], la modulación OOK con umbral estático no ha sido incluida en la comparativa. Esto es debido a que, si bien cuando no existe perturbación mecánica ofrece resultados relativamente positivos, en presencia de ésta su rendimiento resultó muy bajo, detectándose raramente algún paquete correcto. En lo que al resto de esquemas de modulación se refiere, claramente la DBPSK es la que presenta mejores resultados para todo el rango de tensiones estudiado, seguida de la OOK con codificación Manchester.

V_{in} vibrador (V_p)	BER (número de errores en 1000 bits)		
	OOK- Manchester	DBPSK	PPM
4	0,124	0	0,766
5	1,192	0	3,404
6	>5	0,015	>5
7	sin datos	>5	sin datos

Tabla 3 - 5. BER bajo excitación mecánica de baja frecuencia (1 Hz a 1 KHz) sobre el canal metálico

V_{in} vibrador (V_p)	BER (número de errores en 1000 bits)		
	OOK- Manchester	DBPSK	PPM
2	0,011	0	0,618
3	1,291	0	3,354
4	3,276	0	>5
5	>5	0,128	sin datos
6	sin datos	0,713	sin datos
7	sin datos	1,103	sin datos
8	sin datos	>5	sin datos

Tabla 3 - 6. BER bajo excitación mecánica (pulsos de 5ms) sobre el canal metálico

3.3.2.5.2. Estudio de BER bajo excitación eléctrica

Para este estudio se conecta el generador de señal directamente a la plancha metálica, aplicando sobre ésta dos tipos de señal claramente diferenciadas: por un lado señales de elevada amplitud y baja frecuencia ($20V_{pp}$ de amplitud y frecuencia desde 0.1 Hz a 1 KHz) para la emulación de descargas electrostáticas y, por otro lado, señales de alta frecuencia (entre 100 KHz y 10 MHz) y amplitud variable, las cuales se utilizan para el modelado de componentes parásitos producidos por la radiación. Los resultados de este estudio son mostrados en la siguiente Tabla 3 - 7 [3 - 33].

V_{in} vibrador (V _p)	BER (número de errores en 1000 bits)		
	OOK- Manchester	DBPSK	PPM
0,4	0	0	0,785
0,5	0	0	1,101
0,6	0	0	>5
0,9	0,163	0	sin datos
1	1,357	0	sin datos
1,1	>5	0	sin datos
1,2	sin datos	0,007	sin datos
1,3	sin datos	3,163	sin datos
1,4	sin datos	>5	sin datos

Tabla 3 - 7. BER con perturbación eléctrica a altas frecuencias (100 KHz – 100 MHz)

En la tabla anterior se puede apreciar como la dinámica de resultados es análoga a las de la excitación mecánica, siendo la modulación DBPSK la que ofrece los mejores resultados seguida de la OOK con codificación Manchester. Por otro lado, se ha comprobado experimentalmente que el sistema es altamente robusto a variaciones de la amplitud de la señal, no produciendo errores en el caso de las modulaciones DBPSK y OOK con codificación Manchester, y resultando en una BER por debajo de 10^{-6} en el caso de la PPM.

Por tanto, a partir del estudio realizado se puede concluir que la modulación DBPSK es la que ofrece mejor rendimiento en cuanto a robustez en un entorno real de funcionamiento y, por tanto, es la que mejor se ajusta a las necesidades de la aplicación que nos ocupa. Así mismo, dichos resultados confirman la elección del tipo de modulación empleada en el sistema anterior, para el que también se utilizó una DBPSK.

3.3.2.6. Diseño del sistema completo basado en una modulación DBPSK

Tras los resultados arrojados por el punto anterior, en el que se demuestra que la modulación DBPSK es la que mejor se adapta a las necesidades de la aplicación que ocupa esta tesis, en este punto se propone un esquema de transmisión y recepción basado en los esquemas presentados previamente para el caso de dicha modulación DBPSK (Figura 3 - 22(d) y Figura 3 - 26).

Con el objetivo de optimizar el consumo de potencia, para los desarrollos realizados, se ha empleado como entrada una señal cuadrada de 0.9 V de amplitud y una tasa de datos de 1 Kbps, por debajo de la máxima tasa de datos, igual a 3.5 Kbps conseguida en las pruebas anteriores.

En la Figura 3 - 28 [3 - 33] se muestra el diagrama de bloques completo del sistema implementado, el cual se detallará a continuación.

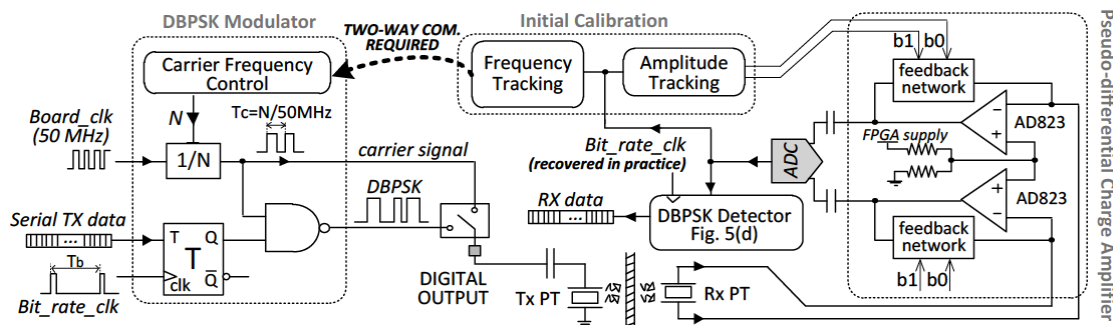


Figura 3 - 28. Diagrama de bloques del sistema implementado

- Modulador Digital DBPSK

En este caso se opta por generar una señal cuadrada en lugar de una senoidal directamente, aprovechando de este modo el propio filtro paso de baja que implementa el canal de ultrasonidos, es decir, su banda de resonancia. Esta solución supone una serie de ventajas que repercutirán en la simplificación de la etapa de generación de la onda modulada, las cuales se listan a continuación:

- El modulador, al ser puramente digital, sólo estará basado en *flip-flops* tipo T y puertas NAND, tal y como se muestra en la Figura 3 - 28.
- Aunque esta solución implica una limitación en cuanto a la máxima amplitud de la señal generada, la cual es directamente proporcionada por los pines de la placa utilizada, la resolución de la frecuencia de portadora se multiplica por el número de ciclos requeridos para generarla. Esta mejora en cuanto a la precisión de selección de la frecuencia portadora es muy importante, debido a que el canal metálico cuenta con numerosos máximos y mínimos en su espectro, los cuales están separados apenas cientos de Hertzios, tal y como se describió previamente. De este modo, aumentando la resolución de la frecuencia portadora se consigue una mejor adaptación al canal desde el punto de vista del transmisor
- Debido a los bajos niveles de tensión empleados, al excitarse piezoeléctrico directamente por un puerto de salida de la placa utilizada, no será necesario el uso de ningún DAC externo ni amplificador a la salida.
- Amplificador de carga pseudo-diferencial

Uno de los principales inconvenientes de los amplificadores de carga comúnmente utilizados a la salida de un sensor es que usan la propia naturaleza capacitiva del piezoeléctrico para implementar la conversión carga-tensión [3 - 17], [3 - 26], [3 - 28] [3 - 37] - [3 - 38]. Esto supone una dependencia muy alta del rendimiento del sistema con la capacidad parásita del propio transductor, lo cual puede ser muy negativo debido a la alta variabilidad de este valor, el cual es directamente dependiente del proceso de fabricación.

Para esta implementación se utiliza un amplificador de carga programable digitalmente (Figura 3 - 29) [3 - 33] basado en el amplificador AD823 de Analog Devices, el cual se montó sobre una placa prototipo alimentada directamente a 3.3 V por la placa que lo controla (FPGA Spartan 3N).

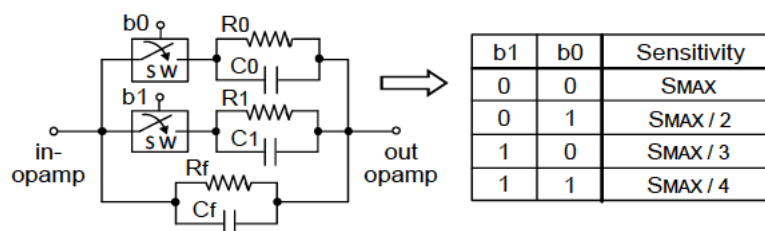


Figura 3 - 29. Esquema de realimentación del amplificador de carga pseudo-diferencial

El esquema implementado consiste en una configuración pseudo-diferencial [3 - 39], usando el esquema de la Figura 3 - 29 como realimentación del circuito, con el objetivo de duplicar la sensibilidad y mejorar el rechazo a señales parásitas en modo común.

De este modo, se seleccionarán unos valores de C_f , R_0 y R_1 de forma que la frecuencia de corte del filtro paso de alta implementado se fije en $f_c = 15 \text{ KHz}$.

- Calibración inicial

Para la calibración inicial se realiza un barrido en frecuencia en pasos de 100 Hz cada 100 ms. El valor absoluto de la señal recibida al otro lado es integrado, devolviéndole al transmisor el máximo valor de potencia recibido para fijar la frecuencia óptima de funcionamiento. Tras fijarse la frecuencia de transmisión, se incrementa progresivamente la sensibilidad del amplificador de carga, hasta que la amplitud recibida sea máxima.

3.3.3. Resultados experimentales

Como se ha comentado en el punto anterior, el primer paso realizado fue el correspondiente a la calibración inicial, para la que se implementó un barrido en frecuencia con un paso de 100 Hz y un tiempo de sensado de 100 ms por tramo, comenzando en 37 KHz y llegando hasta los 48 KHz.

En la Figura 3 - 30 [3 - 33] se puede observar la energía normalizada en color gris, mientras que en color negro se aprecia la respuesta medida a partir de un analizador de red. En ambos casos, la frecuencia óptima (máxima amplitud) está localizada en 39.8 KHz.

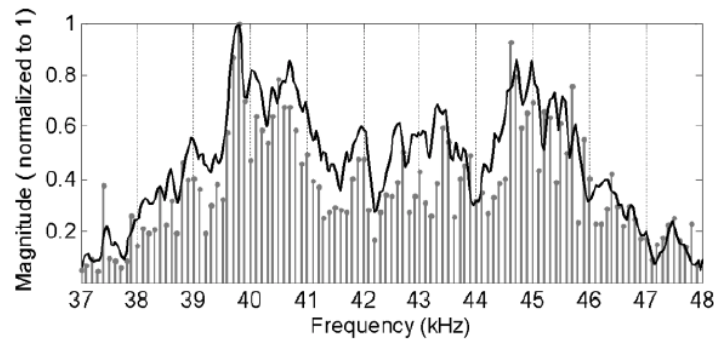


Figura 3 - 30. Resultado del algoritmo de detección de frecuencias óptimas

Para la programación de la sensibilidad del amplificador de carga se ha realizado un barrido en amplitud usando un generador externo. De este modo, se realizó un barrido hasta los 2.7 V, con paso de 50 mV, y conmutando los *switches* para cada uno de los rangos de tensión de entrada. El resultado es el mostrado en la Figura 3 - 31 [3 - 33].

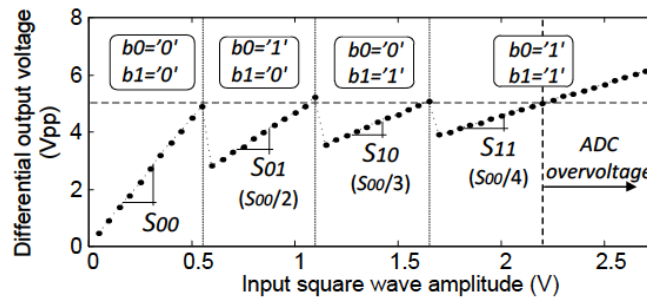


Figura 3 - 31. Ajuste de la sensibilidad del amplificador de carga en función de la tensión de entrada

Tras este análisis, los transductores fueron instalados en la plancha metálica y, siguiendo el mismo proceso de ajuste, resultó una frecuencia óptima de 44.3 KHz empleando una amplitud de 900mV, para la cual también se ajustó la sensibilidad del amplificador de carga. Las formas de onda de las señales transmitida y recibida se ilustran en la Figura 3 - 32 [3 - 33].

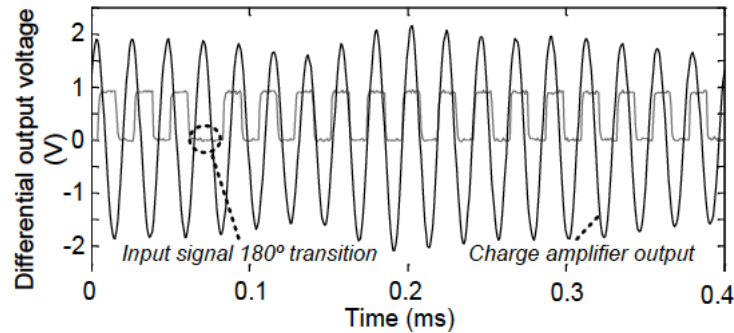


Figura 3 - 32. Señal transmitida y recibida a la salida del amplificador de carga

Finalmente, para la evaluación de la potencia consumida, se monitorizó la corriente generada por el transmisor, obteniéndose una media de consumo de 382 μW (Figura 3 - 33 [3 - 33])

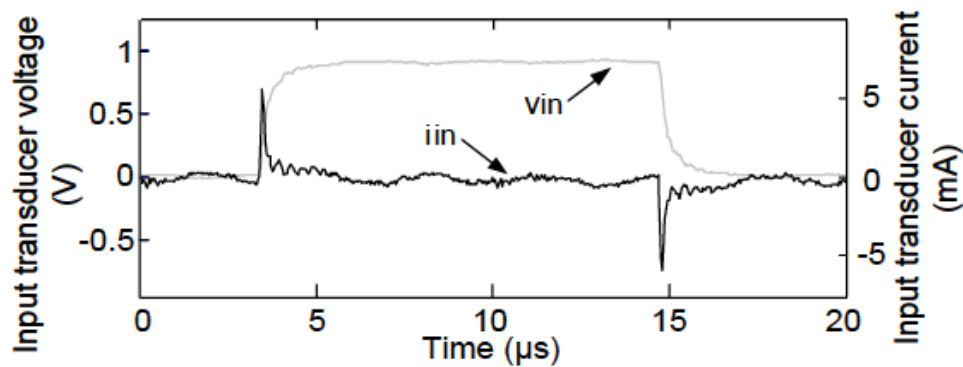


Figura 3 - 33. Tensión y corriente por periodo de la portadora

A modo de resumen, en la Tabla 3 - 8 [3 - 33] se realiza una comparativa con algunos desarrollos realizados para aplicaciones similares, donde se puede apreciar como el trabajo presentado en este apartado minimiza el consumo de potencia, situándose como el de menor consumo de todos los trabajos previos analizados.

Referencia	Tipo	Transductor Sustituible	Área Transductor (mm ²)	Medio	Espesor (mm)	Tensión/ Potencia de entrada	Modulación	Frecuencia portadora (MHz)	Tasa datos (kbps)
Este Desarrollo [3 - 33]	Piezo.	Sí	506	Acero	2	0,9 V ¹ / 0,38 mW	DBPSK	0,04	1 - 3,5
[3 - 21]	Piezo.	Sí	506	Acero	10	3,3 V / 36,3 mW	DBPSK	0,04	5
[3 - 36]	Piezo.	No	225	Acero	4500 ²	5 mW	OOK	1	0,1
[3 - 28]	Piezo.	No	506	Acero	57,15	>30 V	AM	1	30
[3 - 38]	Piezo.	Sí	487	Acero	-	9,6 V	MFSK	0,26 - 0,33	0,36

[3 - 17]	EMAT	Sí	-	Acero	25,4	1,23 W	QPSK	1	1
[3 - 8]	Piezo.	No	50	Alum.	7	30 V	AM	3	1-1,5
[3 - 6]	Piezo.	Sí	254	Acero	115	20 V	DBPSK	1	5
[3 - 7]	Piezo.	No	506	Acero	152,4	10 V	AM	1	0,435

¹ Señal cuadrada

² Transmisión a lo largo de una tubería

Tabla 3 - 8. Comparativa de distintos sistemas de comunicación por ultrasonidos en canal metálico

3.3.4. Conclusiones

El sistema presentado en este apartado parte de la necesidad de actualizar y mejorar el rendimiento del desarrollo del apartado 3.2.

Desde ese punto de vista, en esta solución se realizan aportaciones enfocadas, principalmente, a la reducción del consumo de potencia, la maximización del rendimiento del mismo y la minimización del coste de implementación. Asimismo, se describe la implementación de un modulador DBPSK puramente digital, *basado en flip-flops*, sin necesidad de utilizar ADCs o DACs externos y minimizando, por tanto, el consumo y el coste del dispositivo. En esta línea, también se presenta el diseño de un nuevo dispositivo de fijación de los piezoeléctricos que mejora el contacto entre éstos y las paredes del contenedor, las cuales son emuladas por una plancha metálica. Finalmente, con objeto de optimizar el rendimiento del sistema, se realiza un análisis del canal de transmisión, bajo condiciones de excitaciones parásitas que emulan condiciones de trabajo reales, y se implementa una red de impedancias programable digitalmente para optimizar la frecuencia de transmisión y la sensibilidad del receptor.

Finalmente se realizan las pruebas de validación correspondiente, las cuales arrojan como resultado principal la mejora del consumo de potencia en dos órdenes de magnitud respecto del sistema original.

3.4. Diseño de un sistema de monitorización no invasivo para el transporte de mercancías en contenedores optimizado en ancho de banda

El diseño que se describe en este apartado se ha desarrollado en colaboración con la Universidad Pública de Navarra así como con otros miembros del Grupo de Ingeniería Electrónica (GIE) de la Universidad de Sevilla especializados en el desarrollo de sistemas OFDM. Así mismo, los resultados de dicho diseño dieron origen a la publicación [3 - 29].

3.4.1. OFDM como alternativa para la mejora del ancho de banda del sistema de transmisión de información por ultrasonidos

Tras haber realizado la implementación y la evaluación de modulaciones básicas, así como haber demostrado que la modulación DBPSK es la más eficaz de las estudiadas para sistemas que requieran una baja tasa de datos, en este apartado se propone el estudio de modulaciones más complejas para los casos en los que los requisitos en cuanto a ancho de banda sean mayores.

De este modo, dadas las limitaciones en cuanto a ancho de banda se refiere con las que cuentan las modulaciones más simples basadas en una única portadora, en este apartado se propone el uso de modulaciones multi-portadoras. Concretamente se propone la implementación de una OFDM, para la que se implementará su versión simplificada definida en el estándar PRIME v1.3.6. Este tipo de modulaciones ofrecen, además de la ya mencionada mejora del ancho de banda, una robustez superior, principalmente en canales como los empleados en esta aplicación, los cuales pueden contar con desvanecimientos dependientes de la frecuencia. Así mismo, dados los buenos resultados obtenidos con la modulación DBPSK, se implementarán ésta y otras modulaciones angulares sobre un esquema OFDM.

Finalmente, es necesario comentar que la mayor parte del resto del sistema, salvo que se detalle lo contrario, seguirá basada en el descrito en el punto 3.2, debido a que ambas mejoras de dicho sistema (la descrita en el punto 3.3 y ésta) fueron realizadas de manera simultánea.

3.4.2. Acoplamiento de señal

Tal y como se ha comentado en la descripción del anterior desarrollo, el acoplamiento de las impedancias acústicas del transductor y del canal metálico tiene un impacto muy alto sobre el rendimiento del sistema y, por tanto, es importante optimizarlo tanto como sea posible. En este punto, se describe la caracterización experimental realizada para comparar ambos métodos de sujeción del transductor, es decir, los métodos fijos y los temporales descritos previamente. De este modo, se utilizaron, por un lado, las fijaciones magnéticas usadas en [3 - 21] y, por el otro, la resina de tipo epoxi Araldite 2011. Ambos métodos de sujeción fueron caracterizados experimentalmente sobre una plancha metálica de dimensiones $1 \times 1 \times 0.07 \text{ m}^3$, es decir, emulando las características de las paredes metálicas de los contenedores. El resultado de la respuesta en frecuencia obtenida para ambos modos puede observarse en la Figura 3 - 34 [3 - 29].

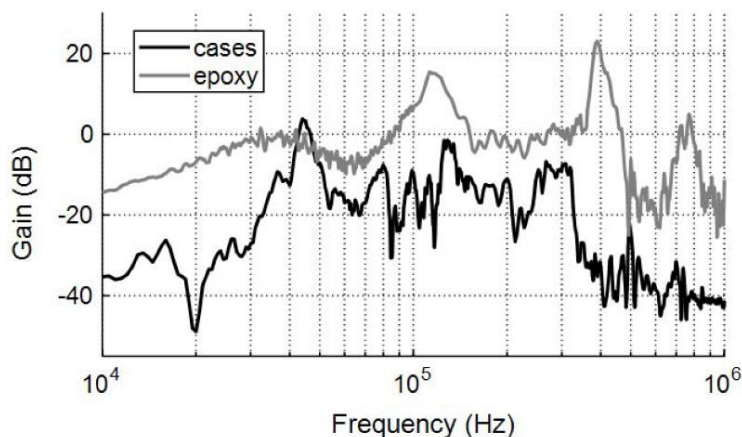


Figura 3 - 34. Respuesta en frecuencia usando resina epoxi e imanes

Se puede observar cómo existe una gran dependencia de la respuesta en frecuencia del sistema con el método de fijación del transductor. En líneas generales, se aprecia cómo el transductor fijado con la resina epoxi presenta una ganancia superior a la obtenida empleando los imanes, a excepción de la banda alrededor de 40 KHz, para la que la fijación magnética presenta un rendimiento ligeramente superior. Es decir, el empleo de la resina epoxi, modifica la respuesta en frecuencia del par transmisor-receptor, apareciendo otras bandas de resonancia.

De este modo, se observa cómo, para el caso de la resina epoxi, aparece una banda de máxima ganancia (en torno a 20 dB) alrededor de 360 KHz. En dicha banda, además, se observa un incremento del ancho de banda, el cual es de 30 KHz aproximadamente. Este efecto supone una segunda mejora,

además del incremento de ganancia, respecto a la transmisión en la banda de la frecuencia nominal (40 KHz), donde el ancho de banda es de unos 10 KHz. Por tanto, en este apartado se propondrá el aprovechamiento de estas características del canal para mejorar las prestaciones del sistema implementado, tanto en lo referente a la capacidad de transmisión de datos como en lo referente a la eficiencia en la transmisión, ya que aprovechando esta mayor ganancia se podrá reducir la tensión de entrada en el transductor transmisor y, por tanto, el consumo total del sistema.

Por otro lado, en cuanto al grosor del canal metálico, es importante tener en cuenta la variabilidad de la amplitud de la onda transmitida a lo largo de este canal de comunicación, es decir, dependiendo de la longitud del canal la onda llegará al otro lado o no. De este modo, la siguiente ecuación define la localización del máximo de dicha onda [3 - 8]:

$$N = (D^2 - \lambda^2)/4\lambda \quad (3 - 2)$$

donde D es el diámetro del transductor (2.5 cm para el transductor seleccionado) y λ es la longitud de onda (con $\lambda = v/f$, siendo v es la velocidad acústica de propagación en el acero, la cual es aproximadamente igual a 5150 m/s), y. Por tanto, para la frecuencia seleccionada de 360 KHz resulta que el máximo de la onda estaría localizado en $N = 0.735$ cm, el cual es un valor muy similar al del espesor del canal de comunicaciones establecido (0.7cm). Por tanto, empleando los parámetros seleccionados, se estará trabajando en unas condiciones cercanas a las óptimas que proporciona el canal.

3.4.3. Modulación OFDM implementada

Tras la justificación previa de la utilización de OFDM como esquema de modulación, para la mejora de prestaciones de ancho de banda, y de la selección del método de fijación del transductor al contenedor, así como de su banda de trabajo (alrededor de 360 KHz), en este apartado se describe la implementación OFDM que se realiza, la cual cuenta con las características listadas a continuación:

- 128 portadoras, de las cuales 97 activas
- Separación entre portadoras de 250 KHz
- Ancho de banda de 24.5 KHz
- Código FEC convolucional opcional
- Código cíclico de 16 muestras
- Preámbulo de inicio para detección y sincronización
- Modulaciones a implementar: DBPSK, DQPSK, D8PSK

Con el objetivo de implementar un sistema de bajo coste y bajo consumo para esta aplicación se han utilizado, de nuevo, tanto en el transmisor como en el receptor, sendos microcontroladores Cortex-M3 modelo STM32F103RD del fabricante *STMicroelectronics*. Como se comentó previamente, se trata de microcontroladores con arquitectura ARM de 32 bit, de bajo consumo y altas prestaciones, en los que se integran, entre otros periféricos, ADCs y DACs de 12 bit [3 - 24].

El esquema del sistema OFDM implementado se ilustra en la Figura 3 - 35 [3 - 29], cuya descripción se presenta en los siguientes apartados.

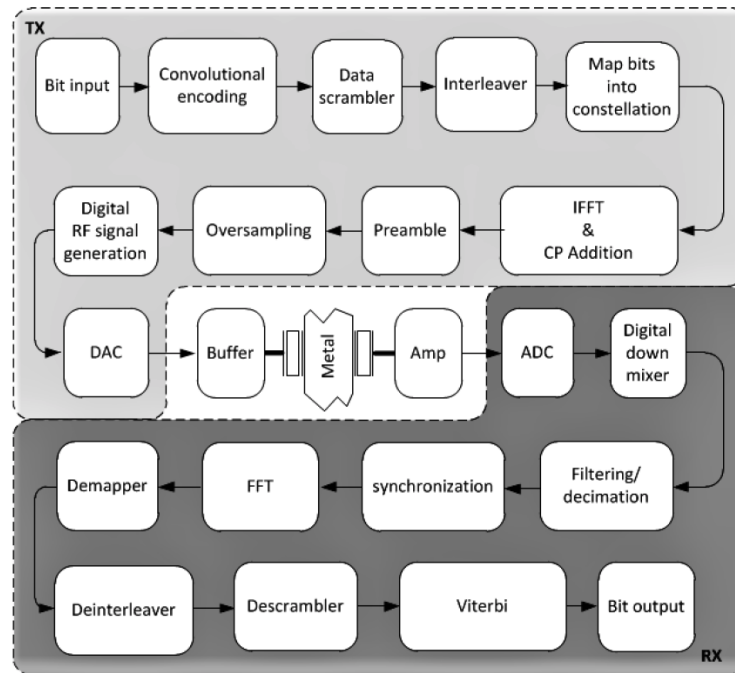


Figura 3 - 35. Esquemas de transmisión y recepción OFDM

3.4.3.1. Implementación del Transmisor OFDM

Tal como se muestra en la Figura 3 - 35, el flujo de bits a transmitir se hace pasar por un bloque de codificación convolucional con corrección tipo FEC (*Forward Error Correction*), el cual es el método de corrección de datos más utilizado para OFDM. Este bloque realiza modificaciones convolucionales de los datos de entrada aplicando los polinomios generadores '1111001' y '1011011', aumentando la longitud de la cadena de datos y añadiendo robustez de la misma, de modo que posibilita que estos datos puedan restaurarse en el destino de una forma más fiable ante pequeñas alteraciones derivadas de errores en el canal durante la transmisión. La utilización de este bloque es completamente opcional y podría desactivarse para mejorar la tasa de bit efectiva.

Posteriormente, la cadena de bits resultante es introducida en el *scrambler block*, con el objetivo de aleatorizar el orden de los mismos y, por tanto, reducir el "factor de cresta"⁸ que se produce antes largas cadenas de '0' o '1' seguidos. A menudo, en aplicaciones OFDM, debido a los desvanecimientos selectivos en frecuencia que pueden producirse, no todas las portadoras llegan a destino con la misma amplitud, por lo que la idea de este bloque es aleatorizar los datos de forma que no se produzcan errores de ráfaga de la cadena de bits en canales donde la transmisión sea menos fiable.

Posteriormente en el bloque *interleaver*, los bits son agrupados en pequeños bloques en los que vuelven a ser reorganizados de forma que bits que anteriormente eran adyacentes no lo son.

Tras el *interleaver*, en el *Mapper* básicamente se realiza el mapeo de la ristra de bits con las portadoras correspondientes. En nuestro caso se utilizarán hasta 128 sub-portadoras DPSK, permitiendo la transmisión de 128, 256 o 512 bits por símbolo.

Seguidamente, cada uno de los símbolos en el dominio de la frecuencia es pasado al dominio temporal aplicándole la transformada IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) y añadiendo, además, un código cíclico para minimizar el efecto multi-trayecto. Se trata del bloque más importante del esquema

⁸ Relación entre el valor de pico y el valor efectivo de la señal

OFDM, debido a que es éste el que aporta la propiedad de ortogonalidad a las distintas portadoras y que, por tanto, posibilita la transmisión simultánea de éstas.

Tras el paso al dominio temporal, se añade un preámbulo al principio de la trama, el cual facilitará el proceso de sincronización en el receptor. Finalmente, se subirá la señal hasta la frecuencia de portadora y se hará uso del DAC integrado en el microcontrolador para generar la señal analógica que sirve de entrada al transductor.

Por último, aunque se pretende transmitir en la banda de 360 KHz, esta frecuencia resulta muy elevada para ser generada con precisión por el DAC integrado en el microcontrolador. Por tanto, con el objetivo de conseguir el incremento del ancho de banda buscado sin elevar el coste de la electrónica, se propone explotar la alta no linealidad que presenta el canal, con el objetivo de transmitir en el quinto armónico de la portadora. De este modo, empleando el quinto armónico de una frecuencia de portadora de 72 KHz, estaríamos transmitiendo en la banda de 360 KHz empleando solamente los recursos del microcontrolador, y evitando así el uso de circuitería adicional.

Así mismo, con el objetivo de muestrear con el DAC con suficiente precisión, se empleó una frecuencia de muestreo 4 veces superior a la de portadora ($f_{s1} = 4 \cdot f_{c1}$).

Finalmente, antes de excitar al transductor con la señal generada se emplea un buffer para proporcionar los niveles de corriente necesarios.

3.4.3.2. Implementación del Receptor OFDM

El primer elemento de la cadena de recepción es el amplificador de carga que realiza la conversión carga-tensión, y cuya implementación es similar al de la Figura 3 - 6.

Al igual que ocurría en el desarrollo descrito en la sección 3.3.1, la sensibilidad del filtro paso alta de primer orden implementado es inversamente proporcional a la capacidad de realimentación C_f , mientras que la frecuencia de corte del filtro se sitúa en $f_{CHF} = 1/2\pi C_f R_f$. De esta forma, con unos valores de $C_f = 10 \text{ pF}$ y $R_f = 50 \text{ K}\Omega$ se maximiza la sensibilidad del filtro y se sitúa la frecuencia de corte por debajo de la banda de interés.

El siguiente paso es la conversión analógico-digital. Para ello se utiliza nuevamente el ADC integrado en el propio microcontrolador STM32F103RD, con el objetivo de reducir los costes de la implementación. Así mismo, con el objetivo de minimizar el consumo de potencia en esta etapa, se decidió implementar un proceso de adquisición basado en submuestreo, es decir, empleándose una frecuencia de muestreo por debajo de la tasa de Nyquist.

Para ello, con el fin de evitar el *aliasing*, para una señal en la banda de frecuencia centrada en f_c y con un ancho de banda B , se debe cumplir lo detallado en la Ecuación (3-3) [3 - 30]

$$\frac{2 \left(f_c - \frac{B}{2} \right)}{m - 1} > f_s > \frac{2 \left(f_c + \frac{B}{2} \right)}{m} \quad (3 - 3)$$

Donde m es el número de réplicas de la señal en el rango $[0, f_c - B/2]$, con un valor entre 1 y el entero inmediatamente inferior a $((f_c + B/2)/B)$.

Por otro lado, para escenarios no lineales como es el de esta aplicación, las posibilidades de elección de la frecuencia de muestreo son más reducidas, debido a que también hay que evitar *aliasing* con los distintos armónicos de la señal. Con este objetivo, habrá que cumplirse la siguiente relación [3 - 31]:

$$if_c + n_k f_s \leq j f_c + (n_k + 1) f_s \quad (3 - 4)$$

Donde if_c y $j f_c$ son dos armónicos de f_c y n_k es el entero inmediatamente inferior a $(j f_c - i f_c)/f_s$.

Debido a que en nuestro caso se está empleando el quinto armónico de la frecuencia f_c como señal de interés, los valores asignados a i y j serán múltiplos de 1/5, en lugar de números enteros, con el objetivo de evitar el *aliasing* precisamente sobre el quinto armónico de f_c .

Partiendo de las dos ecuaciones anteriores ((3 - 3) y (3 - 4)), la frecuencia de muestreo seleccionada para el ADC es $f_{s2} = 320 \text{ KHz}$, de forma que se obtenga una réplica de f_{c1} (360KHz) en $f_{c2} = 40 \text{ KHz}$. La elección de estos valores implica, además, que el proceso de mezclado está directamente implementado en el ADC del microcontrolador, sin necesidad de usar elementos externos, de nuevo con el objetivo de minimizar costes y consumo.

Una vez que la señal ha sido digitalizada pasará por el resto de bloques señalados en la Figura 3 - 35. En primer lugar, la señal será pasada a banda base y filtrada. Posteriormente, se realiza el procesamiento de la señal para, a través de un proceso de correlación, detectar el preámbulo de la señal y, por tanto, localizar el inicio de trama.

Tras esto, se elimina el prefijo cíclico, y cada símbolo recibido es procesado aplicándole la FFT (*Fast Fourier Transform*), obteniéndose la magnitud y la fase de cada una de las sub-portadoras. Después, se realizan los procesos inversos a los bloques *mapper*, *interleaver* y *scrambler*, para, finalmente, tras utilizar un decodificador Viterbi, obtener la trama de datos transmitidos.

3.4.4. Resultados experimentales

Las pruebas experimentales fueron realizadas sobre un contenedor real, con paredes de espesor de 7 mm, de acuerdo con la normativa ISO correspondiente [3 - 32].

De la misma forma que se hizo con las modulaciones anteriormente implementadas, sobre el esquema OFDM se realizaron varias implementaciones distintas, con el objetivo de comparar la eficiencia de cada una de ellas en términos de consumo de energía y de robustez (BER). Para ello se utilizaron distintos niveles de tensión a la salida del DAC y se evaluó el efecto de incluir el módulo FEC en el esquema de modulación. En lo que a los datos transmitidos se refiere, se utilizaron, para cada test, 2000 tramas de 33 bytes de longitud cada una.

Los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 3 - 9 [3 - 29]. En ella se puede observar cómo la BER disminuye cuando se incluye el módulo FEC y también a medida que se aumenta la tensión de salida del DAC. Respecto a los datos suministrados en la tabla, hay que tener en cuenta que se considera $BER=0$ cuando ésta resulta menor a $2 \cdot 10^{-5}$. Además, se puede apreciar cómo los resultados obtenidos reflejan una tasa de error aceptable incluso para el caso más desfavorable.

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	0	0	0	0	0,00007
DQPSK	0	0	0	0,00024	0,0149
D8PSK	0	0,0003	0,0003	0,0204	0,0718
DBPSK+FEC	0	0	0	0	0
DQPSK+FEC	0	0	0	0	0
D8PSK+FEC	0	0	0	0,00039	0,00079

Tabla 3 - 9. BER obtenida para diferentes modulaciones OFDM

Una vez realizada la evaluación del rendimiento del canal en lo que a tasa de errores se refiere, se realizó un estudio de la eficiencia del mismo en términos de energía consumida.

Para ello, se ha calculado el tiempo de transmisión de una trama de 33 bytes utilizando la siguiente ecuación:

$$T_{tx} = (N_{pr} + (N_{cp} + N_{ifft})N_{sym})/f_{bb} \quad (3 - 5)$$

donde N_{pr} , N_{cp} y N_{ifft} son, respectivamente, el número de muestras del preámbulo (igual a 40), el número de muestras del código cíclico (igual a 16) y el número de muestras del símbolo (igual a 128). Por otro lado, N_{sym} es el número de símbolos necesarios para transmitir 33 bytes y f_{bb} es la frecuencia de muestreo en banda base (32 KHz). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3 - 10 [3 - 29].

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	36,875	9,21875	2,124	0,72275	0,236
DQPSK	25,625	6,40625	1,476	0,50225	0,164
D8PSK	14,375	3,59375	0,828	0,28175	0,092
DBPSK+FEC	70,625	17,65625	4,068	1,38425	0,452
DQPSK+FEC	36,875	9,21875	2,124	0,72275	0,236
D8PSK+FEC	25,625	6,40625	1,476	0,50225	0,164

Tabla 3 - 10. Energía normalizada consumida (μ J) para distintos escenarios

Como se puede apreciar en la Tabla 3 - 10 la cantidad de energía consumida disminuye tanto con la amplitud a la salida del DAC como con el empleo de modulaciones con más símbolos. No obstante, en este caso se evidencia como la inclusión del FEC supone un incremento de la energía consumida significativo.

Además, el sistema también se ha caracterizado respecto a su EVM (*Error Vector Magnitude*), la cual es una figura de mérito que refleja la diferencia entre la constelación recibida y la ideal y que, además, es independiente de la modulación. La ecuación que define esta figura de mérito es la siguiente [3 - 40]

$$EVM = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{k=2}^{65} |r_k^i - r_{k-1}^i e^{-(2j\pi/M)\Delta b_{k-1}}|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{k=2}^{65} |r_k^i|^2} \quad (3 - 6)$$

donde r_k^i es la k^{th} portadora de la salida FFT para el símbolo i , L representa el número de símbolos de la modulación OFDM, M es el número de puntos por constelación (2 para DBPSK, 4 para DQPSK y 8 para D8PSK) y Δb_k representa la decisión sobre el símbolo recibido. Los valores obtenidos de EVM se muestran en la Tabla 3-12 [3 - 29], donde se observa cómo sólo dependen de la tensión empleada, no de la modulación.

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	19,8	18,86	16,51	12,56	7,78
DQPSK	19,24	18,63	16,12	12,25	7,49
D8PSK	19,42	18,68	16,14	12,29	8,83
DBPSK+FEC	19,16	18,38	16,24	12,3	7,64
DQPSK+FEC	18,95	18,29	16,27	12,31	7,82
D8PSK+FEC	19,15	18,5	16,24	12,42	8,78

Tabla 3 - 11. EVM obtenida para distintos escenarios

Por tanto, el mejor escenario viene dado por el uso de la modulación D8PSK con una tensión de generación de 50 mV_{rms}, en tanto que se trata del caso que minimiza la energía consumida dentro de los escenarios que presentan menor BER y mayor EVM.

No obstante, para los casos en los que el requisito fundamental sea minimizar el consumo de potencia la mejor opción sería, teniendo en cuenta los casos con menor BER, una DQPSK con FEC y una tensión de excitación de 4 mV_{rms}.

En la Figura 3 - 36 (izda.) [3 - 29], se puede comprobar cómo, para la constelación de la D8PSK representada, las ubicaciones de las 8 regiones de decisión están suficientemente separadas, dando lugar a una BER muy baja.

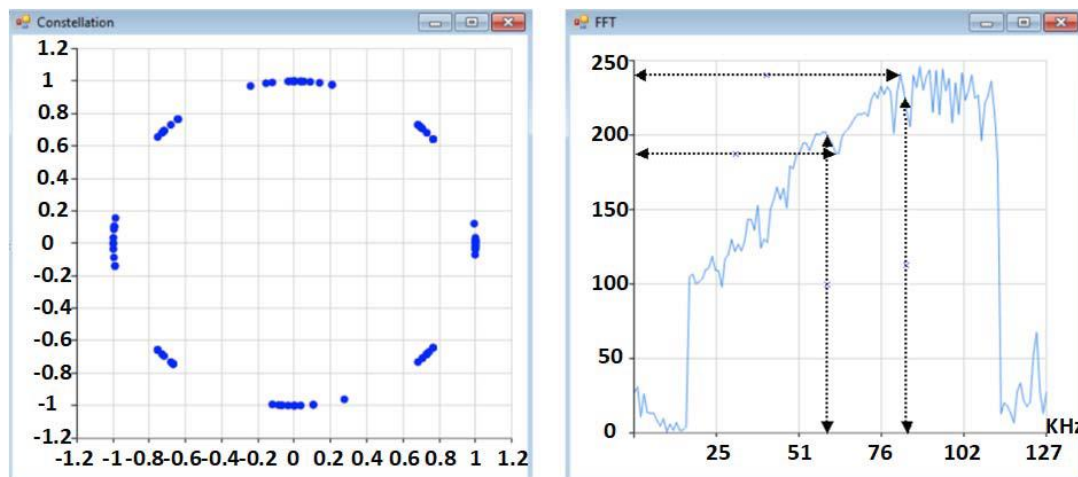


Figura 3 - 36. Constelación recibida (Izda.) y respuesta del canal (Dcha.) para una modulación D8PSK

En la imagen de la derecha se muestra la respuesta del canal para una FFT de 256 puntos, donde se puede comprobar cómo la banda de interés (59.75 – 84.25 KHz), es decir, la banda centrada en 72 KHz con ancho de banda de 24.5 KHz, está muy próxima a la región de máxima ganancia.

Por último, en la Tabla 3 - 12 [3 - 29] se presenta una comparativa de los resultados obtenidos con los de otros trabajos similares existentes a nivel de investigación.

Publicac.	Tasa de datos (Kbps)	Modulació n	Tensión/Potencia de Entrada	Espesor de la pared (cm)
[3 - 7]	0,435	AM	10 V	15,24
[3 - 8]	1	AM	30 mW	0,7
[3 - 28]	32,5	AM	100 mW	5,7
[3 - 17]	1000	QPSK	1230 mW	2,54
[3 - 26]	17370	OFDM	31 V	6,35
[3 - 21]	2,5	DBPSK	3,3/36,3 mW	1
Este Desarrollo [3 - 29]	50,6	OFDM	141,1 mV / 66,7 μW	0,7

Tabla 3 - 12. Comparativa entre sistemas de comunicación por ultrasonidos en canal metálico

Por un lado, en la tabla anterior se pueden observar algunos diseños más, diferenciados del presentado en este apartado, como es el descrito en [3 - 7], el cual utiliza tecnología EMAT en lugar de piezoeléctricos, presentando una muy baja tasa de datos. Otros trabajos más diferenciados son [3 - 17] y [3 - 26], los cuales presentan una alta tasa de datos, aunque también un alto consumo de potencia, debido a que la atenuación del canal es dependiente de la frecuencia utilizada.

Por otro lado, se pueden encontrar trabajos más similares, como [3 - 8] y [3 - 28], los cuales se pueden considerar de bajo consumo, aunque todavía con un consumo superior al obtenido con el diseño propuesto, a partir del cual se ha incrementado, además, la tasa de datos gracias al uso de una modulación multi-portadora.

También se puede observar, si se compara el sistema desarrollado basado en OFDM con el presentado en el apartado 3.2 ([3 - 21]), cómo se ha incrementado el ancho de banda hasta los 24.5 KHz, lo que supone un incremento de la tasa de datos de hasta 50.6 Kbps, es decir, 25 veces superior. Dicha mejora se ha conseguido gracias a la utilización de la banda de 360 KHz, en lugar de la frecuencia de resonancia nominal del transductor piezoeléctrico (40 KHz). Así mismo, la mejora en cuanto a potencia consumida por el transductor transmisor se ha conseguido gracias al hecho de trabajar en una banda con unos 20 dBm más de ganancia respecto a la banda de 40 KHz. Esto ha posibilitado utilizar una amplitud de entrada al transductor mucho menor.

Además, cabe destacar la minimización del tiempo de transmisión de las ráfagas de datos, el cual resultó en 5.75 ms para el caso de una D8PSK, siendo su valor máximo igual a 28.25 ms para el caso de una DBPSK con FEC. En todos los casos estos tiempos de transmisión fueron reducidos respecto a los 108.8 ms necesarios en [3 - 21].

3.4.5. Conclusiones

En este apartado se ha presentado un nuevo diseño basado en el desarrollo realizado en el apartado 3.2, con el objetivo de maximizar el ancho de banda de transmisión de datos, así como optimizar la

robustez y el consumo de potencia, sin incrementar el coste del sistema. Para ello se parte de la utilización de modulaciones ortogonales.

Inicialmente, se ha realizado una comparativa de la respuesta del canal frente a la utilización de elementos de fijación de los piezoeléctricos fijos (resina epoxi) o temporales (magnéticos). Posteriormente, utilizando la nueva banda de transmisión que aparece en la caracterización del canal, entorno a los 360 KHz, la cual cuenta con mayor ancho de banda y mayor ganancia, se realiza el desarrollo del modulador OFDM. Este modulador explota la no linealidad del canal transmitiendo en el 5º armónico de la portadora (72 KHz), lo que permite modular directamente con el DAC del microprocesador de bajo consumo y bajo coste utilizado. Por su parte, el demodulador OFDM emplea técnicas de submuestreo para conseguir demodular la señal utilizando el ADC integrado del microcontrolador.

Finalmente se ha realizado un análisis experimental del rendimiento de varias modulaciones angulares en términos de BER, energía y EMV, resultando la D8PSK la más eficiente y con cuya implementación se consigue mejorar el consumo, tanto respecto a la aportación inicial ([3 - 21]) como del desarrollo realizado paralelo ([3 - 33]) a la vez que se aumenta significativamente la tasa de datos.

3.5. Conclusiones del capítulo

Este capítulo dio comienzo con el reto de dar solución a la problemática presentada por el sistema desarrollado en el capítulo anterior en cuanto a la necesidad de implementar un canal de información entre el interior y el exterior de los contenedores de mercancías, con el objetivo de explotar todos los beneficios del sistema anterior manteniendo la estanqueidad de dichos contenedores. Para ello, tras un estudio de las tecnologías existentes, se ha optado por la utilización de la tecnología basada en la comunicación por ultrasonidos.

Tras la elección justificada de la tecnología, basada en el estudio del estado del arte y en la comparativa con el resto de tecnologías habilitadoras para esta aplicación, se ha realizado un estudio de las distintas tecnologías existentes para la generación/adquisición de señales de ultrasonidos, resultando la tecnología basada en piezoeléctricos la que mejor se adapta a la aplicación que se trata en este capítulo, principalmente por su bajo coste y alto rendimiento.

Posteriormente, el capítulo se ha centrado en el diseño y desarrollo del sistema, para lo que se ha realizado un estudio de los distintos modelos de piezoeléctricos existentes, seleccionando finalmente el modelo 400EP250 de Prowave, cuya frecuencia nominal es de 40 KHz.

Posteriormente, se ha diseñado una etapa de adaptación basada en un amplificador de carga, así como las etapas de modulación/demodulación. Se ha seleccionado una modulación de tipo DBPSK, debido a la baja tasa de datos requerida por la aplicación, a la robustez que presenta dicha modulación y a que ésta es lo suficientemente simple como para poder implementarla con el propio microcontrolador sin necesidad de incluir elementos externos que aumenten el coste del sistema.

Los resultados experimentales, obtenidos a partir de la caracterización de este diseño integrado en el sistema completo descrito en el capítulo anterior, resultaron satisfactorios en cuanto a fiabilidad (transmisiones correctas de hasta el 97.33%) y bajo consumo, para una tasa de datos de 5 Kbps. De este modo, se ha demostrado la viabilidad de la solución propuesta como alternativa para la implementación de contenedores inteligentes dentro del paradigma IoT.

Por otra parte, tras el diseño de este primer sistema de referencia, se ha abordado el diseño en paralelo de dos nuevos sistemas para optimizar las prestaciones conseguidas: el primero de ellos en cuanto a consumo y el segundo de ellos en cuanto a ancho de banda.

En cuanto a la primera propuesta de optimización, inicialmente se ha desarrollado un nuevo soporte para mejorar el contacto entre el piezoeléctrico y la pared del contenedor, debido a que gran parte de la energía consumida está relacionada con la desadaptación entre las impedancias en esa interfaz.

Posteriormente, se ha realizado una caracterización del canal a partir del empleo de cuatro esquemas de modulación diferentes: OOK, OOK-Manchester, DBPSK y PPM. El rendimiento de estas modulaciones fue analizado bajo condiciones de excitación eléctrica y mecánica, situando a la modulación DBPSK como la que mejor rendimiento presenta para esta aplicación. Una vez decidido el esquema de modulación, se abordó su diseño a nivel electrónico, el cual explota el comportamiento del canal como un filtro paso de baja, lo que posibilita la generación de la información directamente a partir de una señal cuadrada en lugar de una senoidal. Esto posibilita que la implementación de la DBPSK se pueda realizar desde un modulador puramente digital. Por otro lado, en recepción se utiliza un amplificador de carga pseudo-diferencial programable, el cual elimina la dependencia del rendimiento de la recepción con la capacidad parásita del propio amplificador. Finalmente, el sistema fue caracterizado experimentalmente, mejorándose las prestaciones en cuanto a consumo respecto al desarrollo anterior.

Por otro lado, para la segunda propuesta de optimización se ha empleado una modulación de tipo OFDM como alternativa para la mejora del sistema en lo que a ancho de banda y robustez se refiere.

Para esta implementación, se ha realizado una comparativa, basada en la caracterización del canal, entre los distintos medios de fijación del piezoeléctrico a la pared metálica, es decir, los basados en resinas epoxi y los basados en carcasas magnéticas. A partir de esta caracterización se observó, para el caso de las resinas, una banda de resonancia alrededor de 360 KHz, la cual cuenta con mayor ganancia y mayor ancho de banda que la empleada previamente a 40 KHz. Por tanto, empleando esta banda de frecuencias, no sólo se conseguirá aumentar la capacidad de transmisión del sistema, si no también disminuir su consumo, al requerirse tensiones menores para excitar al transductor. Así mismo, con el objetivo de minimizar el consumo total del sistema se ha propuesto explotar la alta no linealidad del canal de transmisión, de modo que se transmita el 5º armónico de una señal de menor frecuencia (72 KHz) con el objetivo de emplear el DAC de bajo coste integrado en el microcontrolador. Así mismo, con el mismo objetivo de disminuir el consumo, se propone el uso de técnicas de submuestreo en recepción.

Finalmente, tras la implementación de una modulación OFDM de 128 portadoras, se pasó a la fase pruebas de campo (realizadas sobre un contenedor real) en la que se determinó cómo la D8PSK es el esquema óptimo para esta aplicación, obteniéndose una tasa de datos de unos 50 Kbps y un consumo a la entrada del transductor de $67 \mu W$. Por tanto, se han conseguido mejorar las prestaciones respecto al estado del arte anterior, presentándose el diseño propuesto como un sistema muy fiable para su utilización como sistema de monitorización no invasivo de contenedores de mercancías.

3.6. Referencias

- [3 - 1] Atlas, L., McVittie, P., (2013). "Detecting objects in shipping containers by vibration spectral analysis". US Patent 8,571,829 B2
- [3 - 2] Hsiongwei, H., (2006) "Freight container monitoring system" US Patent 7,106,244 B2
- [3 - 3] Speasl, J. A., Dante, E., (2007), "Transportable container including an internal environment monitor". US Patent 7.156.129 B2

- [3 - 4] Chitre, M., Shahabudeen, S., Freitag, L., & Stojanovic, M. (2008). "Recent advances in underwater acoustic communications & networking". OCEANS 2008, . <https://doi.org/10.1109/oceans.2008.5289428>
- [3 - 5] Kilfoyle, D., & Baggeroer, A. (2000). "The state of the art in underwater acoustic telemetry". IEEE Journal of Oceanic Engineering, 25(1), 4–27. <https://doi.org/10.1109/48.820733>
- [3 - 6] Murphy T., (2006) "Ultrasonic Digital communication System for a Steel Wall Multipath Channel: Methods and Results," Master's thesis, Rensselaer Polytechnic Institute
- [3 - 7] Saulnier, G. J., Scarton, H. A., Gavens, A. J., Shoudy, D. A., Murphy, T. L., Wetzel, M., Bard, S., Roa-Prada, S., & Das, P. (2006). "Through-Wall Communication of Low-Rate Digital Data Using Ultrasound". 2006 IEEE Ultrasonics Symposium, . <https://doi.org/10.1109/ultsym.2006.358>
- [3 - 8] Kluge, M., Becker, T., Schalk, J., & Otterpohl, T. (2008). "Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes". 2008 IEEE Sensors, . <https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716378>
- [3 - 9] Welle R., (1999) "Ultrasonic data communication system", US Patent 5,982,297.
- [3 - 10] Welle R., (2000) "Ultrasonic power sensory system", US Patent 6,127,942.
- [3 - 11] Payton R., (2003) "System for acoustically passing electrical signals through a hull," US Patent 6,625,084.
- [3 - 12] Primerano, R., Kam, M., & Dandekar, K. (2009). "High bit rate ultrasonic communication through metal channels". 2009 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems. <https://doi.org/10.1109/ciss.2009.5054845>
- [3 - 13] Sherrit, S., Doty, B., Badescu, M., Bao, X., Bar-Cohen, Y., Aldrich, J., & Chang, Z. (2006). "Studies of acoustic-electric feed-throughs for power transmission through structures". Smart Structures and Materials 2006: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, . <https://doi.org/10.1117/12.657736>
- [3 - 14] Shoudy, D. A., Saulnier, G. J., Scarton, H. A., Das, P. K., Roa-Prada, S., Ashdown, J. D., & Gavens, A. J. (2007). "An Ultrasonic Through-Wall Communication System with Power Harvesting". 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. <https://doi.org/10.1109/ultsym.2007.465>
- [3 - 15] Smalser P., (1997) "Power transfer of piezoelectric generated energy", US Patent 5,703,474.
- [3 - 16] Hu, Y., Zhang, X., Yang, J., & Jiang, Q. (2003). "Transmitting electric energy through a metal wall by acoustic waves using piezoelectric transducers". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 50(7), 773–781. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2003.1214497>
- [3 - 17] Graham, D. J., Neasham, J. A., & Sharif, B. S. (2011). "Investigation of Methods for Data Communication and Power Delivery Through Metals". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(10), 4972–4980. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2103535>

- [3 - 18] Halmshaw, R. (1987). "Non-destructive Testing: Edward Arnold".
- [3 - 19] Davies, S. J., Edwards, C., Taylor, G. S., & Palmer, S. B. (1993). "Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(3), 329–348. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/3/001>
- [3 - 20] Gonzalez, R., Hidalgo, E., Oya, J.R., Muñoz, F., Onieva, Luis, Cortes, P., Guadix, J., Muñuzuri, J., (2017) "Sistema y método de monitorización de contenedores de carga de paredes metálicas", Patente española ES 2 639 765 A1.
- [3 - 21] Hidalgo Fort, E., Garcia Oya, J. R., Munoz Chavero, F., & Gonzalez Carvajal, R. (2018b). "Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8), 2734–2738. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2745717>
- [3 - 22] Prowave 400EP250. (s.f.). <http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/ep/40ep250.htm>
- [3 - 23] Lang, W., Jedermann, R., Mrugala, D., Jabbari, A., Krieg-Brückner, B., & Schill, K. (2011). The "Intelligent Container"—A Cognitive Sensor Network for Transport Management. *IEEE Sensors Journal*, 11(3), 688–698. <https://doi.org/10.1109/jsen.2010.2060480>
- [3 - 24] STMicroelectronics. STM32F103RD - STMicroelectronics. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103rd.html>
- [3 - 25] Wanuga, K., Bielinski, M., Primerano, R., Kam, M., & Dandekar, K. R. (2012). "High-data-rate ultrasonic through-metal communication". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 59(9), 2051–2053. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2012.2426>
- [3 - 26] Lawry, T. J., Wilt, K. R., Ashdown, J. D., Scarton, H. A., & Saulnier, G. J. (2013). "A high-performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 60(1), 194–203. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2013.2550>
- [3 - 27] Algueta-Miguel J.M, Lopez-Martin A.J, De la Cruz Blas, C.A, Garde-Luque, M. P., Garcia-Oya, J.R, Garcia-Doblado, J, Muñoz, F., Baena, V., Hidalgo, E., (2017) "Ultrasonic Communication Through Metallic Walls for Monitoring Applications". XXXII Conference on Design of Circuits and Integrated Systems.
- [3 - 28] Ashdown, J. D., Wilt, K. R., Lawry, T. J., Saulnier, G. J., Shoudy, D. A., Scarton, H. A., & Gavens, A. J. (2013). "A full-duplex ultrasonic through-wall communication and power delivery system". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 60(3), 587–595. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2013.2600>
- [3 - 29] Garcia Oya, J. R., Algueta Miguel, J. M., Garcia Doblado, J., Munoz Chavero, F., Hidalgo Fort, E., Baena Lecuyer, V., & Lopez Martin, A. J. (2018). "Subsampling OFDM-Based Ultrasonic Data Communication Through Metallic Channels for Monitoring of Cargo Containers". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2882565>

- [3 - 30] R. G. Vaughan, N. L. Scott, and D. R. White, "The theory of bandpass sampling," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 39, no. 9, pp. 1973–1984, Sep. 1991.
- [3 - 31] Oya, J. R. G., Kwan, A., Ghannouchi, F. M., Bassam, S. A., & Chavero, F. M. (2014). "Design of Dual-Band Multistandard Subsampling Receivers for Optimal SNDR in Nonlinear and Interfering Environments". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(4), 981–983. <https://doi.org/10.1109/tim.2013.2297651>
- [3 - 32] Abbate, S., Arvenuti, M., Corsini, P., Panicucci, B., Passacantando, M., & Vecchio, A. (2012). "An Integer Linear Programming Approach for Radio-Based Localization of Shipping Containers in the Presence of Incomplete Proximity Information". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3), 1404–1419. <https://doi.org/10.1109/tits.2012.2188518>
- [3 - 33] Algueta-Migue, J. M., Garcia-Oya, J. R., Lopez-Martin, A. J., Blas, C. A. D. L. C., Chavero, F. M., & Hidalgo-Fort, E. (2019). "Low-Power Ultrasonic Front-End for Cargo Container Monitoring". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1. <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2939704>
- [3 - 34] Mechanical Wave Driver - SF-9324: PASCO. (n.d.). Retrieved from https://www.pasco.com/prodCatalog/SF/SF-9324_mechanical-wave-driver/index.cfm
- [3 - 35] Paternoster, A., Vanlanduit, S., Springael, J., & Braet, J. (2018). "Vibration and shock analysis of specific events during truck and train transport of food products". *Food Packaging and Shelf Life*, 15, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.12.002>
- [3 - 36] Chakraborty, S., Saulnier, G. J., Wilt, K. W., Curt, E., Scarton, H. A., & Litman, R. B. (2015). "Low-power, low-rate ultrasonic communications system transmitting axially along a cylindrical pipe using transverse waves". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 62(10), 1788–1796. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2015.007078>
- [3 - 37] T. Lawry, (2011) "A high-performance system for wireless transmission of power and data through solid metal enclosures," Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2011.
- [3 - 38] Hosman, T., Yeary, M., & Antonio, J. K. (2011). "Design and Characterization of an MFSK-Based Transmitter/Receiver for Ultrasonic Communication Through Metallic Structures". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(12), 3767–3774. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2149270>
- [3 - 39] Massarotto, M., Carlosena, A., & Lopez-Martin, A. J. (2008). "Two-Stage Differential Charge and Transresistance Amplifiers". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(2), 309–320. <https://doi.org/10.1109/tim.2007.909498>
- [3 - 40] Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers for PRIME Networks, document TU-T Rec.9904, Oct. 2012

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE SISTEMAS IOT PARA MONITORIZACIÓN, GESTIÓN Y DIAGNOSIS DE INFRAESTRUCTURAS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

SISTEMA DE INVENTARIO Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES DE TRÁFICO EN CARRETERAS Y ENTORNOS URBANOS BASADO EN RFID PASIVO.....	131
SISTEMA DE INVENTARIO Y MONITORIZACIÓN DE SEÑALES DE TRÁFICO EN CARRETERAS Y ENTORNOS URBANOS BASADO EN RFID PASIVO.....	161
SISTEMA Y MÉTODO DE MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DE CORREAS DE ASCENSORES BASADOS EN REFLECTOMETRÍA Y OPTIMIZADO PARA UN ENFOQUE IOT	188
MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL	199
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	212
REFERENCIAS.....	213

Como se desprende de los Capítulos 2 y 3 de esta Tesis, el núcleo fundamental de la misma es la aplicación del paradigma IoT a los sistemas de monitorización de contenedores de mercancías. Sin embargo, el marco de IoT es muy amplio y el catálogo de posibles aplicaciones en las que se puede aplicar es aún mayor. Por ese motivo, en el presente capítulo se presentan otras aplicaciones enmarcadas dentro de este paradigma.

Por un lado, se presenta un sistema de inventario de señales de tráfico en carretera, extensible a aplicaciones de inventario de mobiliario urbano así como a aplicaciones de navegación alternativas al GPS. Para dicho desarrollo se utiliza RFID (Radio Frequency Identification) como tecnología habilitadora, debido al potencial que ofrece a nivel de especificaciones, el bajo coste de los dispositivos y, como se detallará en la sección 4.1, al hecho de ser una tecnología muy madura en el marco del transporte (como son las

comunicaciones *Infrastructure-to-Vehicle*, I2V), de la conservación y del guiado de carreteras. Uno de los indicadores de que RFID es y será importante en el mercado IoT es que algunas empresas de referencia, como Google o Intel, crearon la asociación AIM Global, dando lugar a la alianza RAIN, que evidencia la sinergia existente entre los sistemas RFID e IoT, la Industria 4.0 o BlockChain [4 - 1].

Por otro lado, otro de los campos en los que se prevé que IoT tenga una presencia muy significativa es en el de la seguridad en el transporte. En este caso, centramos su aplicación en el transporte vertical o, más concretamente, en ascensores. El paradigma IoT aporta a este campo ventajas muy importantes, como son la conectividad con la nube y la transmisión de información en tiempo real, posibilitando el desarrollo de aplicaciones que tienen gran impacto en este área, como son la monitorización continua del ascensor, el diagnóstico remoto o el mantenimiento predictivo. El sistema que se presenta en la sección 4.2 se centra en la monitorización del estado de salud de uno de los elementos más importantes de los ascensores, como es la correa que une la cabina con el motor que la sostiene y la desplaza. Además, el desarrollo realizado parte de varias premisas básicas en los sistemas IoT, como la minimización del coste de los dispositivos y de la cantidad de información transmitida. En este marco se presenta una solución novedosa basada en el principio utilizado por los reflectómetros.

Al igual que en el transporte de mercancías y en el mantenimiento de las carreteras, otro de los campos donde las tecnologías IoT están marcando la tendencia de las líneas de investigación y desarrollo es el de la Monitorización de la Salud Estructura (*Structural Health Monitoring*, SHM), las cuales se encargan de extraer información sobre la salud de las infraestructuras civiles con el fin de garantizar y prolongar las condiciones de trabajo saludables de las mismas [4 - 2] durante todo su periodo de servicio. Para ello se dota a los nodos sensores de capacidad para monitorizar las vibraciones de las estructuras así como para detectar, entre otros, efectos de corrosión, estrés o grietas.

La aplicación del paradigma IoT a este marco de trabajo posibilita el despliegue de grandes redes de dispositivos inalámbricos capaces de extraer información de la estructura y enviarla a la nube para su posterior procesamiento remoto, donde la tecnología posibilita utilizar máquinas de procesamiento tan potentes como se desee. Por otro lado, la integración de la información en la nube permite la fácil integración de aplicaciones a través de servicios de Internet, lo que, por otro lado, permite extrapolar la monitorización de edificios o infraestructuras civiles singulares a sistemas mucho más generalistas, como las Smart Cities.

Desde el punto de vista de los beneficios que IoT le ofrece a los sistemas SHM tradicionales, se pueden destacar, por un lado, la monitorización en tiempo real de las estructuras, lo que permite optimizar las tareas de mantenimiento y el despliegue de grandes cantidades de sensores, permitiendo, a su vez, conocer en detalle el comportamiento de las infraestructuras. Por otro lado, los sistemas SHM se beneficiarán del desarrollo de complejas herramientas de ayuda a la toma de decisiones, las cuales no son posible desplegar localmente por las limitaciones existentes en cuanto a capacidad de cálculo de los nodos.

Por tanto, a lo largo del capítulo se detallará el desarrollo y la validación de tres sistemas de inventario y monitorización aplicados sobre elementos singulares e importantes en la sociedad actual, como son las carreteras, las infraestructuras civiles y los sistemas de transporte vertical.

4.1. Sistema de inventario y monitorización de señales de tráfico en carreteras y entornos urbanos basado en RFID pasivo

En esta sección se propone la utilización de la tecnología RFID pasiva como tecnología habilitadora para sistemas de inventario de carreteras, así como para aplicaciones derivadas de esta. Para ello, partiendo de unos objetivos específicos, se desarrollará un modelo teórico, el cual se validará con una batería completa de simulaciones y finalmente en base a una serie de pruebas de campo. Finalmente, se realizará una comparativa con sistemas similares con el fin de ubicar al sistema desarrollado en el estado del arte. Antes de acometer la descripción del sistema cabe comentar que su diseño se desarrolló en el marco de los siguientes proyectos de investigación:

- SEVINCI_RFID (IPT-2001-0731-370000): Incremento en la SEguridad Vial mediante INventario de Carreteras y guiado en Itinerarios por RFID.
- Estrategias de Diseño Microelectrónico para IoT en Escenarios Hostiles (TEC2016-80396-C2-2-R).

Finalmente, antes de detallar el desarrollo del sistema, cabe comentar que dicho desarrollo ha dado lugar a las publicaciones [4 - 3] y [4 - 4].

4.1.1. Introducción

El riesgo de accidentes de tráfico es intrínseco a los propios sistemas de transporte. Sin embargo es posible minimizar la probabilidad de que éstos ocurran y las consecuencias de los mismos. La tendencia se caracteriza por la disminución tanto de accidentes como de fallecimientos año tras año, sin embargo los resultados no son aún aceptables.

Algunas de las medidas que ayudan a que esa tendencia se mantenga están relacionadas con la señalización de las carreteras, por lo que resulta muy importante que el inventario de las mismas se encuentre actualizado [4 - 4].

El mantenimiento de carreteras en España cuenta con un inventario de carreteras en el que almacena tanto la posición como la fecha de la instalación de cada una de las señales de tráfico desplegadas en las carreteras. No solo es importante tener este registro almacenado, sino que, además, hay que mantenerlo actualizado, pues éste ayuda a determinar el estado de las mismas en función de su antigüedad o a planificar los nuevos despliegues que deban realizarse.

No obstante, debido a la gran cantidad de señales existentes, a menudo estos inventarios están desactualizados, ya que el número de señales que desaparecen por accidentes de tráfico o por vandalismo es elevado. En la actualidad, el inventariado de dichas señales se realiza a través de la inspección periódica de las carreteras a través de cámaras de vídeo. Históricamente las imágenes eran inspeccionadas por personas, lo cual implicaba unos costes temporales y económicos elevados.

Hoy día es muy común disponer de vehículos que cuentan con procesamiento de vídeo en tiempo real, y que ofrecen servicios como el propio reconocimiento de señales de tráfico, la detección de intersecciones [4 - 5] o el límite de los carriles [4 - 6], lo cual sitúa a este tipo de procesados como una tecnología apropiada para el inventariado automático de las señales de carretera.

Sin embargo, las soluciones comentadas en el párrafo anterior tienen una serie de problemas derivados de la posible falta de visibilidad de las señales a inventariar, lo cual es algo muy común cuando hay falta de luminosidad [4 - 7], cuando se trata de instalaciones urbanas [4 - 8] o cuando las condiciones temporales son adversas.

Por los motivos anteriormente comentados aparecen algunas propuestas que resuelven esas limitaciones utilizando técnicas basadas en el reconocimiento 3D [4 - 9], o arquitecturas basadas en la monitorización múltiple combinando técnicas de reconstrucción 2D y 3D [4 - 10].

Al igual que ocurría con el procesado automático de imágenes, éstas últimas propuestas también minimizan el trabajo de inspección manual optimizando así los tiempos y costes dedicados a estas tareas, así como eliminando factores como la fatiga acumulada en largas jornadas de trabajo que pueden llevar a error en el caso humano.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que los vehículos que inspeccionan las carreteras y realizan el inventario viajan a una velocidad reducida debido a que deben medir otros parámetros para el mantenimiento como son la curvatura, el peralte o la inclinación de las carreteras. Por este motivo, con el fin de afectar al tráfico lo menos posible, se recomienda realizar estas tareas durante la noche, lo cual imposibilita la inspección de las señales de tráfico mediante imágenes [4 - 9]-[4 - 11].

El trabajo detallado en este capítulo propone la utilización de la tecnología RFID como medio para solventar los problemas derivados de la captura de imágenes en condiciones adversas (oscuridad, obstáculos, temporales, etc.)

Se propone dotar a las señales de tráfico de una etiqueta RFID que, además de identificar a una señal, pueda almacenar información adicional, como el tipo de señal, su ubicación georreferenciada, etc. En el otro lado de la comunicación se encontraría el vehículo que recorre las calles y carreteras, donde sería necesario instalar un lector RFID.

La justificación de proponer RFID no solo radica en su capacidad para dar solución a los problemas que presentan el resto de tecnologías en aplicaciones de este ámbito, sino también en su madurez, ya que se trata de una tecnología ampliamente utilizada para la gestión de inventarios, cobro electrónico, control de puertas, gestión de accesos, etc. En la Tabla 4 - 1 se muestran algunos ejemplos del uso de la tecnología RFID en aplicaciones de carreteras.

Ref.	Aplicación	Tecnología	Frecuencia (MHz)
[4 - 12]	Detección de señales de tráfico embarcada en vehículo	Pasiva	13,56
[4 - 13]	Detección de señales de tráfico embarcada en vehículo	Activa	2400-2488
[4 - 14]	Sistema de Alertas de señales de tráfico	Activa	867
[4 - 15]	Controlador de velocidad	Activa	433
[4 - 16]	Posicionamiento de vehículos en túneles	Activa	417,05-435,9
[4 - 17]	Posicionamiento de vehículos	Activa	902-928
[4 - 18]	Localización de vehículos para aplicaciones IoT	Pasiva	0,125-0,134
[4 - 19]	Reconocimiento de luces de carretera	Pasiva	13,56
[4 - 20]	Monitorización de atascos	Activa	2400

[4 - 21]	Control de atascos, detección de ambulancias y vehículos robados	Pasiva	0,125
[4 - 22]	Localización de vehículos autónomos	Pasiva	870
[4 - 23]	Identificación de vehículos	Pasiva	920-923
[4 - 24]	Identificación de vehículos	Pasiva	860-960
[4 - 25]	Reconocimiento de posición de vehículo	Pasiva	917-923,5
[4 - 26]	Identificación de vehículos	Pasiva	910-920

Tabla 4 - 1. Sistemas RFID en aplicaciones de carreteras

Como se puede observar, la tecnología RFID ya se usa en varios de los sistemas propuestos para aplicaciones de carretera, así en las publicaciones [4 - 12]-[4 - 15], [4 - 27] se utiliza como tecnología habilitadora para los nuevos sistema de ayuda a la conducción. De esta forma, en [4 - 12] se presenta un sistema de asistencia al conductor avanzado (ADAS) en el que las etiquetas RFID (en adelante se hablará de etiquetas o *tags* indistintamente) que han sido instaladas sobre el pavimento informan al conductor, a través de RFID, de las condiciones de la carretera (curvas peligrosas, límites de velocidad, eventos puntuales, etc.) de manera que los propios vehículos pueden adaptar la marcha automáticamente al tipo de situación detectada. En este caso [4 - 12], la tecnología utilizada consigue un alcance de lectura de etiquetas RFID de apenas 40 cm a una velocidad máxima de 20 Km/h, lo que supone una limitación para una aplicación como la que se propone en este apartado. Posteriormente, en [4 - 27] se realiza una actualización de este sistema, [4 - 12], que reduce la cantidad de etiquetas RFID necesarias para conseguir la misma información.

Por otro lado, [4 - 13]-[4 - 15] utilizan la tecnología RFID activa para aumentar el rango de alcance de las etiquetas en el marco de los sistemas ADAS. Así, [4 - 14] y [4 - 15] proponen la utilización de estas etiquetas RFID activas (instaladas en las señales de tráfico) como parte de los sistemas de control de velocidad de los vehículos que cuenten con la tecnología y cuya aplicación puede ser extrapolada a otras situaciones como la proximidad de intersecciones o aviso de puntos críticos en las rutas. En este caso se propone la utilización de 2 lectores RFID en lugar de 1 para minimizar el número de casos de etiquetas no detectadas. Los resultados, que serán detallados en puntos posteriores del presente capítulo, verifican el correcto funcionamiento de la aplicación en velocidades inferiores a 24 Km/h.

Otra aplicación en la que se ha usado la tecnología RFID activa es en el guiado o encaminamiento de rutas cuando la señal GPS no está disponible (bosques densos, pequeñas calles, túneles, etc.), como se propone en [4 - 16] y [4 - 17]. Para ello, se hace uso de unos algoritmos que detectan la posición del vehículo en función de la potencia recibida por las etiquetas dispuestas a ambos lados de la carretera, túnel o ruta.

Por tanto, en base a los desafíos que presentan los sistemas de comunicación IoT ([4 - 18]-[4 - 29]) e I2V ([4 - 30]-[4 - 31]), se desprende la conveniencia de incorporar RFID como tecnología habilitadora en las instalaciones viales.

Analizando la Tabla 4 - 1, se puede observar cómo, en líneas generales, la tecnología RFID activa ofrece mayores rangos de cobertura [4 - 11], incluso cuando el lector se encuentra instalado en vehículos que viajan a alta velocidad. No obstante, el uso de la tecnología RFID en este campo de aplicación sería mucho más viable si se usaran etiquetas pasivas en lugar de activas. Esto es debido a que las etiquetas activas cuentan con una batería interna que es necesario reemplazar una vez que finalizan su ciclo de vida, por lo que supone un incremento del coste del servicio mientras que para el caso de la tecnología

pasiva no es necesaria la utilización de estas baterías, por lo que el coste del servicio a gran escala sería el coste de las etiquetas, el cual es despreciable frente al coste de las señales que monitorizan.

También se pueden apreciar en la Tabla 4 - 1 algunas aplicaciones en las que se usa RFID pasivo, [4 - 18],[4 - 19],[4 - 21]-[4 - 26], aunque en estos casos, en lugar de para inventario de señales de tráfico se utiliza para identificación de vehículos ([4 - 23][4 - 24][4 - 26]), lo que requiere la colocación del lector en la carretera y la etiqueta en el vehículo, o para localización de vehículos ([4 - 18],[4 - 22],[4 - 25]), donde se instala el lector en el vehículo y las múltiples etiquetas a lo largo del recorrido del mismo. Esto implica que la distancia entre las etiquetas y el lector pueda ser menor a la requerida en el caso de aplicaciones de inventario y, por tanto, que esta tecnología sea, a priori, más adecuada para dichas aplicaciones que para la realización de inventarios, lo cual será discutido en detalle más adelante.

A lo comentado en el párrafo anterior habría que añadir que, a medida que la velocidad del vehículo se incrementa, el tiempo de detección para cada señal disminuye pudiendo estar por debajo del mínimo tiempo requerido para que el lector detecte, al menos una vez, cada etiqueta pasiva. Esto es un parámetro limitante incluso teniendo en cuenta los últimos avances obtenidos en cuanto a rendimiento de etiquetas RFID pasivas [4 - 32], especialmente sobre elementos metálicos ([4 - 33],[4 - 34]).

Por tanto, del estudio realizado del estado de la técnica se desprende que la tecnología RFID pasiva no se ha aplicado todavía al inventario de señales de carretera, lo cual deja un vacío tecnológico que se presenta como un desafío que será abordado en el presente capítulo, en el que se propondrá y validará, tanto a nivel de simulación como experimental, el uso de esta tecnología para esta aplicación. Cabe comentar que el diseño del sistema propuesto partirá del trabajo realizado en [4 - 4], donde se realizaron unos desarrollos preliminares a este trabajo. Con el presente diseño se aporta, adicionalmente, un estudio teórico y a nivel de simulaciones del comportamiento de la tecnología RFID para elementos móviles, una comparación experimental entre el rendimiento de etiquetas activas y pasivas, y la capacidad de ubicación georreferenciada de las señales a partir de la información almacenada en las etiquetas, el cual supone un servicio de valor añadido sobre los sistemas anteriormente referenciados, y que únicamente implementan tareas de inventariado o ubicación ([4 - 12][4 - 13][4 - 16][4 - 17][4 - 27]).

El trabajo realizado en este capítulo continúa con una descripción del sistema propuesto y de los aspectos de implementación más importantes (codificación de la información, requisitos de las etiquetas, estimación de costes, etc.), un modelado del radioenlace RFID, y la validación del sistema propuesto a nivel de simulación y, por último, a nivel experimental. Finalmente, se realiza una comparativa con el resto de sistemas existentes y se detallan las conclusiones extraídas del trabajo realizado.

4.1.2. Descripción del sistema y aspectos de implementación

4.1.2.1. Descripción del sistema

Como se ha comentado anteriormente el sistema propuesto consiste en un lector RFID instalado en el/los vehículo(s) utilizados para realizar las tareas de inventariado y una etiqueta RFID pasiva de bajo coste instalada en cada señal de tráfico. Estas etiquetas deben contener la información deseada codificada en su código de identificación, el cual debe ser único por tarjeta, de forma que la identificación sea unívoca.

El proceso de identificación comienza cuando el lector, instalado en el vehículo, transmite vía radio las solicitudes de identificación de las tarjetas RFID pasivas. Posteriormente, los *tags* que se reciban esa petición devolverán su identificador al lector. Finalmente, la información recolectada por el lector RFID será comparada en tiempo real con la información previamente almacenada en una base de

datos ,con el objetivo de localizar una nueva señal o la ausencia de alguna de éstas para, finalmente, notificárselo a la empresa encargada del mantenimiento de la carretera.

Adicionalmente, el identificador RFID cuenta con la información codificada de las coordenadas georreferenciadas donde se encuentra instalada la señal, de forma que es posible posicionar con precisión cada señal en el mapa. Por otro lado, la utilización de la tecnología RFID solventa los problemas que ocasiona la posible baja visibilidad de las señales de tráfico para los sistemas basados en el procesado de imágenes, haciendo posible la detección de las señales en condiciones de oscuridad o de presencia de obstáculos entre el lector y la etiqueta, e, incluso, teniendo capacidad para detectar simultáneamente varias señales de tráfico muy cercanas o sobre el mismo mástil. En la Figura 4 - 1 se presenta la arquitectura general del sistema propuesto.

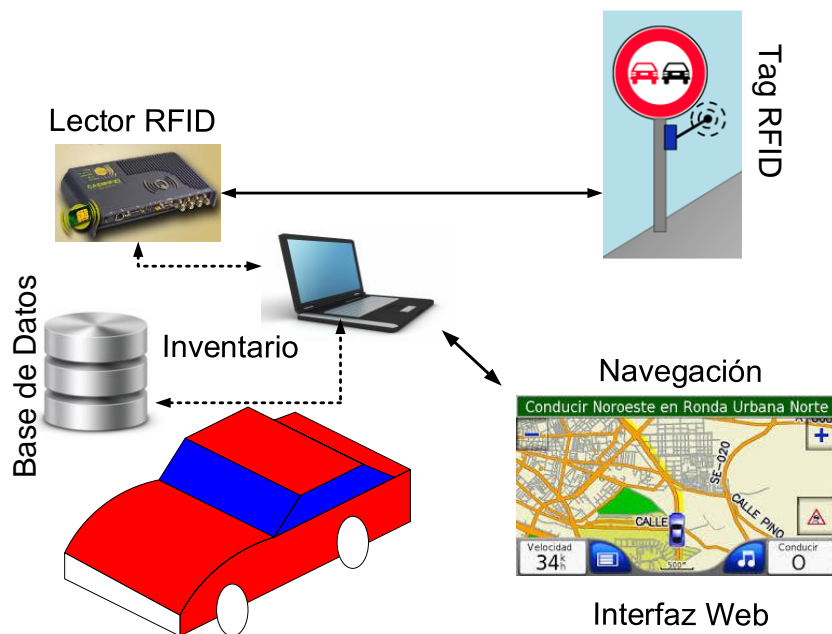


Figura 4 - 1. Visión general del sistema

Entre las características más interesantes que este sistema aporta como novedad a los anteriormente existentes destacan las siguientes:

- Los *tags* o etiquetas identifican unívocamente a las señales pudiendo almacenar información adicional sobre éstas (localización, fecha de instalación, tipo de señal, etc.)
- No son necesarias labores de mantenimiento debido a que no necesitan batería ni otros componentes susceptibles de ser sustituidos.
- Se trata de un sistema fácilmente escalable a cualquier elemento de carreteras susceptible de ser inventariado (balizas, semáforos, etc.), no siendo su uso restrictivo únicamente a señales de tráfico.

En el prototipo que se propone en este capítulo, el identificador recibido por el lector RFID, el *Electronic Product Code* (EPC), es enviado a un procesador externo para su procesamiento y almacenamiento.

De esta forma, se pueden identificar las señales que faltan o algunas que puedan haber sido incluidas posteriormente de modo temporal, por ejemplo, como consecuencia de una obra en un tramo de carreteras.

En las siguientes figuras se puede observar un ejemplo de la aplicación propuesta, en el que el mapa generado ofrece una serie de herramientas gráficas para gestionar el inventario, así como un sistema

de navegación de bajo coste y código abierto, especialmente útil cuando la señal GPS no está disponible.



Figura 4 - 2. Localización de las señales de tráfico georreferenciadas

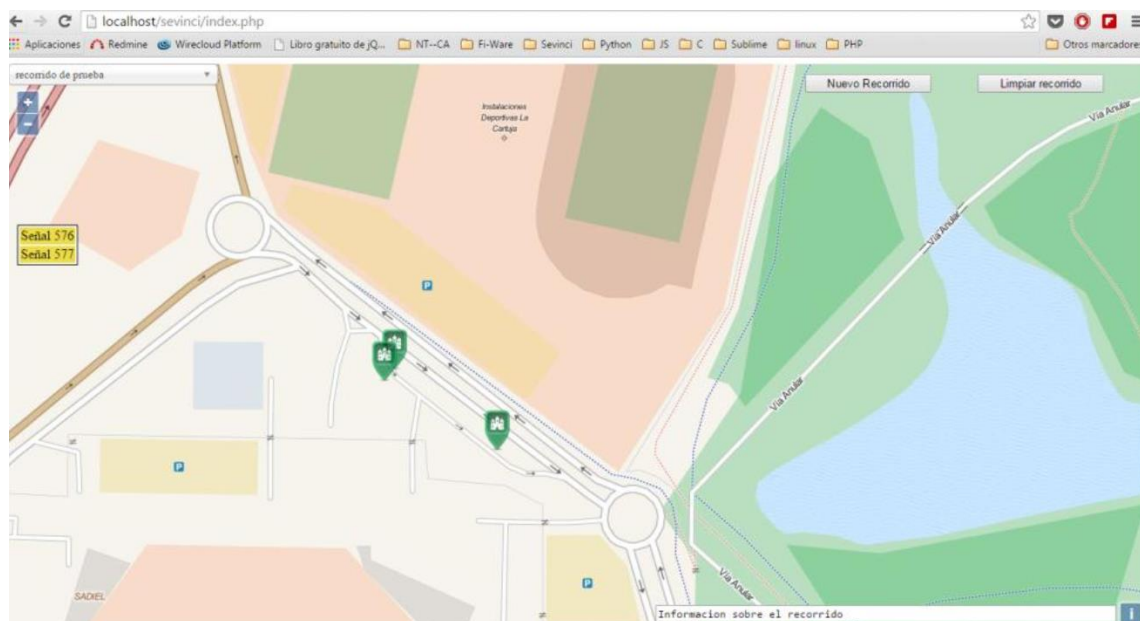


Figura 4 - 3. Mapa con la capa de señales de tráfico habilitada

4.1.2.2. Aspectos de implementación

4.1.2.2.1. Requisitos de los tags y codificación de datos

En este apartado se especifican los requisitos que deben cumplir los *tags* pasivos así como las características de éstos, además de la información que almacenan y cómo se codifica.

Uno de los requisitos que desde el punto de vista de la operabilidad resulta más importante es que se trate de *tags* pequeños y poco pesados, ya que van a ser instalados sobre los mástiles de las señales de tráfico. Adicionalmente, los *tags* deben poder operar sobre superficies metálicas, además de presentar un encapsulado *ruggerizado*, por el hecho de estar instaladas en el exterior. Finalmente, los *tags* deberán contar con la memoria suficiente para almacenar la información deseada, cuyo contenido se detallará a continuación.

El código EPC de los *tags* utilizados es de 96 bits de longitud. Para el almacenamiento de la información en ellos, es necesario tener en cuenta que se ha asumido el formato de nomenclatura de las carreteras españolas, las cuales son divididas en tramos de 5 km de longitud. La información almacenada en las etiquetas se detalla en la Tabla 4 - 2.

Campo	Longitud (Bits)	Descripción
Señal (Sg)	10	Tipo de señal
Número de Señal (SN)	10	Número de señal dentro del tramo
Tramo (St)	8	Tramo de carretera
Carretera (Rd)	26	Identificador de carretera
Kilómetro (Km)	11	Kilómetro de la carretera
Metro (M)	10	Distancia en metros desde el inicio del último Km
Fecha de Instalación (InD)	10	Fecha en la que se instala la señal (para saber si debe ser reemplazada)
CRC	5	Código de redundancia

Tabla 4 - 2. Codificación de información en el EPC

Es importante aclarar la longitud seleccionada para algunos campos. Dado que los tramos de carretera tienen una longitud de 5 km, se puede identificar 1 señal por cada 5 metros de carretera. Por otro lado, el número de tramos se codifica en 8 bits (256 valores posibles) debido a que, si la carretera más larga de España (N-340) tiene 1248 Km (se puede codificar en 11 bits), puede ser dividida en 250 tramos, por lo que con 8 bits es suficiente. Además, la nomenclatura empleada para las carreteras, al menos en España, está compuesta por hasta 2 letras seguidas de 3 cifras numéricas. Por tanto, si codificamos las letras en código ASCII de 8 bits (16 bits para las letras) y fijamos 10 bits para el número tenemos un total de 26 bits de longitud para este campo. Finalmente, se fijan 10 bits para la codificación de la fecha de instalación de la señal, 4 bits para el mes y 6 para el año.

De los 96 bits disponibles solo se están usando 90, por lo que los 6 restantes se dejan para implementaciones futuras. No obstante, el esquema implementado para el inventario de carreteras pudiera ser fácilmente extrapolable al inventario de calles, incluyendo elementos como contenedores, bolardos, etc., abriendo así nuevas oportunidades dentro del paradigma IoT ([4 - 35][4 - 36]).

4.1.2.2.2. Arquitectura software

Desde el punto de vista software, la información recibida desde los *tags*, los códigos EPC, son almacenados en una base de datos MySQL instalada en un dispositivo externo, tal y como se ha comentado con anterioridad. Estos códigos EPC llevan asociados el par de coordenadas georreferenciadas, el cual se genera automáticamente y se inserta en la base de datos de forma que cada señal queda perfectamente ubicada en el mapa durante el inventario inicial. Las tecnologías utilizadas para la implementación de estas funcionalidades son *PHP*, *Javascript* y *JQuery*. El mapa utilizado es generado a partir del *framework Openlayers*.

4.1.2.2.3. Consideraciones relacionadas con el coste

Como ya se ha comentado, uno de los aspectos más importantes a la hora de desplegar una nueva tecnología es el coste que ésta supone. En la propuesta de sistema que se hace en este capítulo, el

requisito del coste ha estado presente desde el principio, siendo uno de los principales motivos que ha hecho que el sistema utilice RFID pasivo en lugar de RFID activo. Esto es debido a que las etiquetas pasivas toman la alimentación de la radiada por la antena del lector y no necesita batería interna, mientras que la tecnología activa sí que necesita esas baterías instaladas en las etiquetas y que por tanto suponen un coste añadido, aunque por norma general, también cuentan con un alcance mayor.

A modo de ejemplo, las etiquetas activas pueden llegar a costar hasta 20€ la unidad (a fecha de redacción de este capítulo) mientras que una pasiva puede llegar a los 2.5€ para el caso de una etiqueta *ruggedizada* diseñada para trabajar sobre superficies metálicas ([4 - 37],[4 - 38]).

Para contextualizar correctamente el impacto del coste de las etiquetas es necesario tener en cuenta que el coste de una señal de tráfico puede oscilar entre los 80€ y los 300€ por lo que, mientras que la utilización de etiquetas activas puede incrementarlo significativamente, la utilización de etiquetas pasivas tiene un impacto muy reducido sobre el precio total. Por otro lado, teniendo en cuenta la dimensión de un futuro despliegue total en la red de carreteras españolas, la utilización de las etiquetas pasivas supondría un ahorro de varios millones de euros.

Por otro lado, para el caso de la tecnología activa, además del coste que supone la propia etiqueta con la batería, hay que añadir el coste derivado de la sustitución de éstas cuando se agotan o se degradan, lo cual incluye el coste de las nuevas baterías, así como el del equipo de mantenimiento de las mismas. Finalmente, es necesario destacar la dependencia con el fabricante que supone la utilización de etiquetas activas, ya que no existe un estándar global que defina la comunicación sino que, en la mayoría de los casos, es definida por los propios suministradores de etiquetas activas. Por tanto, por todos estos motivos, la solución basada en etiquetas pasivas resulta la óptima para esta aplicación.

4.1.3. Cálculo del radioenlace RFID

La utilización de la tecnología RFID pasiva en la aplicación que nos ocupa implica que dicha tecnología debe satisfacer una serie de requisitos, entre los que se encuentra tener capacidad para leer etiquetas a una distancia y a una altura determinadas desde un vehículo a una velocidad concreta.

Para llevar a cabo la validación del radioenlace, se parte del modelo de propagación de ondas radio descrito en [4 - 39], el cual se puede completar con los fundamentos detallados en [4 - 15] y [4 - 16], los cuales son extendidos a aplicaciones para carreteras. Concretamente, en [4 - 16] se propone un modelo de transmisión en espacio libre para el cálculo del nivel de señal recibido por parte de las etiquetas RFID. Por otro lado, en [4 - 15] se utiliza un modelo más completo que incluye el efecto multi-trayecto producido por la reflexión de la señal en el suelo, lo que pone de manifiesto que tanto el lector como las etiquetas deben situarse tan elevados como sea posible. No obstante, en estos modelos se asume una situación estática en la que ni las etiquetas ni el lector están en movimiento.

En este capítulo se parte de los modelos detallados en [4 - 15], [4 - 16] y [4 - 39], los cuales son extendidos teniendo en cuenta la velocidad del vehículo, así como las interferencias multi-trayecto de una forma más precisa, incluyendo las producidas en escenarios complejos como entornos urbanos.

4.1.3.1. Descripción del enlace lector-tag

4.1.3.1.1. Principios del radio enlace

En términos generales, el promedio la densidad de flujo radiada, o el promedio del vector de Poynting de una onda electromagnética, viene dado por la siguiente ecuación [4 - 40]:

$$\phi = \frac{e_{rms}^2}{120\pi} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4 - 1)$$

donde e_{rms} es el valor cuadrático medio del campo eléctrico. El área sobre el cual la antena receptora capta la energía de las ondas electromagnéticas recibidas, es decir, la apertura efectiva, se define como [4 - 40]:

$$a_{eff} = g_R \lambda^2 / 4\pi \quad (m^2) \quad (4 - 2)$$

donde g_R es la ganancia de la antena y λ es la longitud de onda (m). Por tanto, la potencia media entregada a la antena receptora es el producto del vector de Poynting y el área efectiva de la antena, o lo que es lo mismo:

$$p_R = \phi \cdot a_{eff} = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{e_{rms}^2}{120\pi} [W] \quad (4 - 3)$$

En el caso de propagación en espacio libre y para una transmisión de potencia p_T (W), el vector de Poynting a una distancia r (m) del transmisor se puede calcular como:

$$\phi = \frac{p_T g_T}{4\pi r^2} \quad (4 - 4)$$

donde g_T es la ganancia de la antena transmisora en la dirección del receptor. Por tanto, de (4 - 1) y (4 - 4) se obtiene que:

$$e_{rms} = \frac{\sqrt{30 p_T g_T}}{r} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4 - 5)$$

Si se supone que la dependencia del campo eléctrico con el tiempo es dada por un seno o un coseno con amplitud de pico $\sqrt{2}e_{rms}$, el campo instantáneo en ese mismo punto sería:

$$e(t) = \frac{\sqrt{60 p_T g_T}}{r} \cos(\omega_c t') \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4 - 6)$$

donde ω_c es la frecuencia de la portadora. Esta ecuación refleja que, debido a que la transmisión de las ondas no es instantánea, el campo recibido en un instante de tiempo t fue emitido en un instante de tiempo t' , anterior a t . Evidentemente, el tiempo transcurrido entre los instantes t' y t es el tiempo que la onda tarda en recorrer la distancia r , o lo que es lo mismo:

$$t' + \frac{r(t')}{c} = t \quad (4 - 7)$$

donde c es la velocidad de la luz. Por tanto, substituyendo en (4 - 6), se obtiene lo siguiente:

$$e(t) = \frac{\sqrt{60 p_T g_T}}{r} \cos(\omega_c t - k_c r) \left[\frac{V}{m} \right] \quad (4 - 8)$$

donde $k_c = \frac{\omega_c}{r} = \frac{2\pi f_c}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{rad}{m} \right)$ es el número de onda y f_c (Hz) es la frecuencia de portadora.

4.1.3.1.2. Propagación en condiciones reales

Si en el punto anterior se ha presentado el modelo que caracteriza la transmisión en espacio libre, lo cual es un caso ideal. Un modelo más realista consistirá en incluir el efecto de la reflexión multi-trayecto. De esta forma, la onda recibida por los *tags* tomará, al menos, dos caminos diferentes, uno directo, r_1 , y otro debido a una reflexión en el suelo, r_2 , tal y como se muestra en la Figura 4 - 4 [4 - 3].

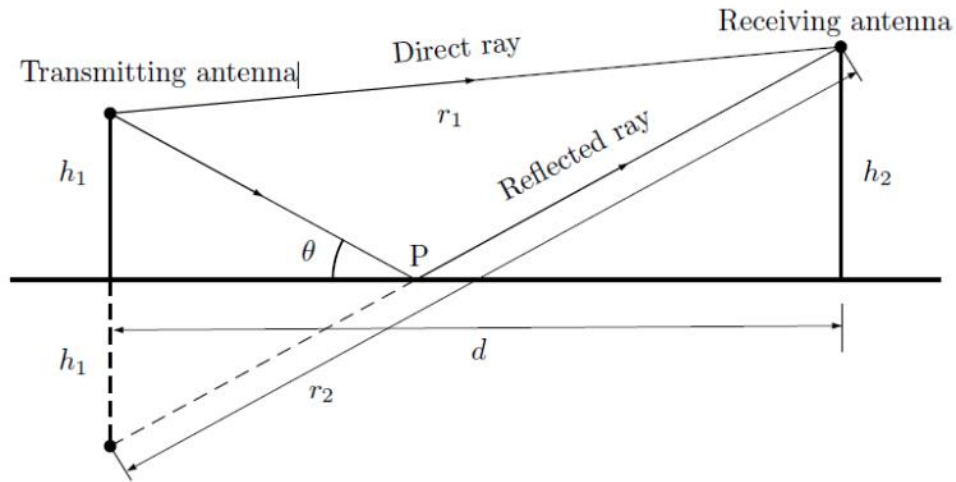


Figura 4 - 4. Reflexión multirrayecto

Si partimos de la ecuación (4 - 8), el campo recibido directamente e_1 en el instante t , siendo la onda transmitida en el instante t_1 , se puede modelar como:

$$e_1(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r_1(t_1)} \cos(\omega_c t - k_c r_1(t_1)) \quad (4 - 9)$$

Si ahora se asume que el vehículo viaja en línea recta y a una velocidad constante v , se obtiene la siguiente ecuación:

$$t_1 = t - \frac{\sqrt{(vt)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 (d^2 + (h_1 - h_2)^2)\right)}}{c} \quad (4 - 10)$$

donde d será la distancia del mástil de la señal de tráfico al vehículo, y h_1 y h_2 son las alturas de la antena transmisora y el *tag*, respectivamente.

Para el cálculo del trayecto reflejado en el suelo es necesario tener en cuenta que, debido a la propia reflexión, se produce un cambio tanto en la amplitud como en la fase de la onda transmitida, los cuales vienen dados por el coeficiente de Fresnel:

$$e \Gamma(\theta) = \rho(\theta) e^{j\Psi} \quad (4 - 11)$$

donde ρ es la atenuación de la amplitud y Ψ es el cambio de fase provocado por la reflexión. Además, es importante advertir cómo el coeficiente de Fresnel no sólo depende del ángulo θ sino también de la polarización del campo. De esta forma, la expresión que modela el campo reflejado sería la siguiente:

$$e_2(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r_2(t_2)} \rho \cos(\omega_c t - k_c r_2(t_2) + \Psi) \quad (4 - 12)$$

donde t_2 es el instante de tiempo en el que la onda reflejada fue emitida, obteniéndose esta expresión de forma análoga a (4 - 10).

No obstante, la inclusión de un segundo trayecto para la onda recibida en el *tag* no modela una situación totalmente real, ya que en entornos urbanos es posible recibir más ondas reflejadas ($e_3(t)$, $e_4(t)$, ..., $e_N(t)$), lo cual sería modelado por:

$$e_n(t) = \alpha_n(t) \cos(\omega_c t - \beta_n(t)) \quad (4 - 13)$$

Donde α_n es la amplitud y β_n la fase de la n -ésima señal reflejada.

Por tanto, el total de la señal recibida en la etiqueta RFID está compuesta por el sumatorio de todas ellas, esto es:

$$e(t) = \sum_{n=1}^N e_n(t) \quad (4 - 14)$$

Desarrollando esto llegamos a:

$$e(t) = r(t) \cos(\omega_c t + \theta(t)) \quad (4 - 15)$$

donde

$$\begin{aligned} r(t) &= \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2} \\ \theta(t) &= \arctan(q(t)/i(t)) \end{aligned} \quad (4 - 16)$$

con

$$\begin{aligned} i &= a \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + \sum_{n=3}^N \alpha_n \cos(\beta_n) \right) \\ q &= a \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + \sum_{n=3}^N \alpha_n \sin(\beta_n) \right) \end{aligned} \quad (4 - 17)$$

y donde

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{60 p_T g_T} \cdot \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{\rho^2}{r_2^2} + 2 \frac{\rho}{r_1 r_2} \cos(k_c(r_2 - r_1) - \Psi)} \\ a_1 &= \frac{\cos(k_c r_1)}{r_1} + \frac{\rho \cos(\Psi - k_c r_2)}{r_2} \\ a_2 &= -\frac{\sin(k_c r_1)}{r_1} + \frac{\rho \sin(\Psi - k_c r_2)}{r_2} \end{aligned} \quad (4 - 18)$$

Se puede observar cómo, por simplicidad, se ha eliminado la dependencia con el tiempo.

De este modo, el valor cuadrático medio del campo recibido, teniendo en cuenta que el valor cuadrático medio de $r(t)$ está representado por r_{rms} , resulta en:

$$e_{rms} = r_{rms} / \sqrt{2} \quad (4 - 19)$$

Por tanto, la potencia media recibida, puede ser calculada como:

$$p_R = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{e_{rms}^2}{120\pi} = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{r_{rms}^2}{240\pi} \quad (4 - 20)$$

Para el cálculo exhaustivo de p_R , los valores de α y β podrían haber sido determinados usando modelos de rayos. No obstante, debido a que no se espera contar con suficientes datos experimentales, deberían ser caracterizados estadísticamente.

Si $N \rightarrow \infty$, el teorema central del límite nos permite suponer que los sumatorios $\sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(\beta_n)$ y $\sum_{n=1}^N \alpha_n \sin(\beta_n)$ serán variables Gaussianas de media 0 y varianza σ^2 .

Por otra parte, si asumimos que la frecuencia a la que se trabaja es 866 MHz, el número de onda k_c será pequeño ($k_c \approx 19$), por tanto, la variación de $r(t)$ en comparación con el $\cos(\omega_c t)$ será pequeña, y podremos asumir en adelante que $r(t)$ es constante y, por tanto, será denominado $r(t) = r$, al menos durante el tiempo necesario para el envío de información entre el lector RFID y el *tag* correspondiente (tiempo del orden de milisegundos). Bajo esta premisa, podemos asumir que $r_{rms}^2 = r^2$ y se corresponde con la suma de los cuadrados de dos variables Gaussianas (I y Q) independientes, lo que, partiendo de (4 - 17), significa que:

$$\begin{aligned}\mu_I &= a \cdot \cos(\arctan\left(\frac{a_2}{a_1}\right)) \\ \mu_Q &= a \cdot \sin(\arctan\left(\frac{a_2}{a_1}\right))\end{aligned}\tag{4 - 21}$$

donde a , a_1 y a_2 fueron definidas previamente. Consecuentemente, la distribución r_{rms}^2 es una *chi cuadrado* no centrada con dos grados de libertad:

$$P(r_{rms}^2) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{r_{rms}^2 + a^2}{2\sigma^2}} I_0(a \cdot r_{rms}/\sigma^2)\tag{4 - 22}$$

donde I_0 es la función de Bessel de primer tipo y orden cero. Finalmente, usando (4 - 22), la probabilidad de que la potencia recibida en el *tag* RFID supere el umbral de detección γ ($P(p_R \geq \gamma) = P(r_{rms}^2 \geq \gamma')$), donde $\gamma' = 960\pi^2\gamma/g_R\lambda^2$, será:

$$P(r_{rms}^2 \geq \gamma') = \int_{\gamma'}^{\infty} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{x+a^2}{2\sigma^2}} I_0\left(a \cdot \frac{\sqrt{x}}{\sigma^2}\right) dx = Q\left(\frac{a}{\sigma'} \frac{\sqrt{\gamma'}}{\sigma}\right)\tag{4 - 23}$$

Donde $Q(\cdot)$ es la función Q de Marcum [4 - 42]. Finalmente, se puede observar como la ecuación (4 - 23) proporciona la probabilidad de que el radioenlace esté disponible durante todo el intervalo de tiempo.

4.1.3.2. Descripción del enlace *tag*-lector

El proceso de envío de información desde la etiqueta al lector RFID utiliza la energía recibida durante el proceso de recepción para emitir los datos en sentido contrario utilizando una fracción η de la potencia recibida. Según se define en la norma ISO/IEC 18000, las etiquetas utilizarán codificación en banda base FM0 o Miller con modulaciones ASK o PSK para transmitir la información.

El procedimiento para el cálculo de la potencia recibida en el lector es análogo al realizado en el punto anterior.

En las siguientes secciones se evaluarán los modelos presentados en el punto anterior, tanto a nivel de simulación como experimentalmente.

4.1.4. Validación del sistema

4.1.4.1. Comparación entre tecnología activa y pasiva

En esta sección se realiza una comparación entre las tecnologías RFID pasiva y activa basada en una serie de experimentos. En principio, se parte de que la tecnología activa se presenta como una solución que ofrece mejores características de alcance, aunque es una solución menos atractiva por los costes que supone para esta aplicación.

4.1.4.1.1. Equipamiento

Componentes pasivos

El catálogo de mercado en lo que a etiquetas RFID pasivas se refiere es muy extenso, y cuenta con etiquetas para aplicaciones generales, así como con otras diseñadas específicamente para resolver algunos de los retos que plantea esta tecnología. El modelo seleccionado para esta aplicación es el Confidex Ironside Class 1 Gen 2 UHF, el cual emplea el estándar *EPC Global 1G2 ISO 18000-6C* para la transmisión de la información.

Esta etiqueta ha sido seleccionada debido a algunas características de catálogo como son su alcance de hasta 9 m cuando es instalada sobre elementos metálicos, su bajo peso (22 g), su nivel de protección IP68 y su diseño *ruggedizado*.

Concretamente, cabe destacar también sus dimensiones ($51.5 \times 47.5 \times 10 \text{ mm}^3$), debido a que las etiquetas que suelen presentar buen rendimiento en entornos metálicos tienen un factor de forma alargado [4 - 41], mientras que el formato de la etiqueta elegida se adapta perfectamente a las dimensiones de los mástiles de las señales de tráfico. Además, cuentan con una capacidad de EPC de 96 a 240 bits, lo que hace viable la codificación descrita en puntos anteriores.

Al igual que ocurre con las etiquetas, la oferta de mercado en lo que a lectores se refiere es muy extensa. El modelo seleccionado ha sido el R4300P ION de Caen FRID, el cual trabaja a frecuencias como 902-928 MHz (FCC part 15) y 865.5-867.6 MHz (ETSI EN 302-208), utilizando el protocolo *EPC Global 1G2 ISO 18000-6C* y una potencia de salida de 32 dBm (1.6 W).

El tercer elemento necesario para contar con un sistema RFID completo es la antena del lector, para lo que se ha seleccionado una de polarización lineal, con ganancia de 8 dBi, rango de frecuencias 860-970 MHz, VSWR (*voltage standing wave ratio*) <1.5:1 y un ancho de haz de 65-69°.



Figura 4 - 5. Antena RFID

Componentes activos

Las etiquetas seleccionadas en el caso activo han sido las Hussar Slim (HKRAT-NT02) y las Garrison Rugged (HKRAT-RT02 y HKRAT-ZT02). Ambos modelos utilizan batería de litio reemplazable y transmiten en la banda de los 2.4 GHz.

Los modelos referenciados en el párrafo anterior transmiten a 0 dBm, presentando, por tanto, un bajo consumo en potencia ($16-18 \mu A @ 3V$). La diferencia entre los dos modelos radica principalmente en su aplicación: mientras que la HKRAT-NT02 se utiliza principalmente para inventario, las Garrison cuentan con un diseño orientado a aplicaciones en entornos hostiles, como son los entornos metálicos. Además, las Garrison cuentan con un nivel de protección superior (IP65) a las Hussar, tienen un tamaño aceptable ($78 \times 33.6 \times 10 \text{ mm}^3$) y una vida útil más larga (sobre 3 años sin cambiar la batería).

El lector utilizado para el caso activo es el EMWF del fabricante Empress, el cual trabaja a la frecuencia de 2.4 GHz (igual que las etiquetas) y utiliza un protocolo de comunicación propietario, lo cual es lo común para RFID Activo. Este lector proporciona un alcance en exteriores de hasta 30-50m, una potencia radiada de 0 dBm y una sensibilidad de -85 dBm empleando una antena omnidireccional sin ganancia. Adicionalmente, utilizando la modulación GFSK, tiene capacidad para la identificación de 100 *tags* simultáneos sin colisiones, proporcionando, además, la capacidad de transmitir la información leída a través de interfaces como 802.11 b/g o TCP/IP.

4.1.4.1.2. Set-up y resultados experimentales

Para la realización de las pruebas de validación se utilizó una configuración como la mostrada en la Figura 4 - 6.

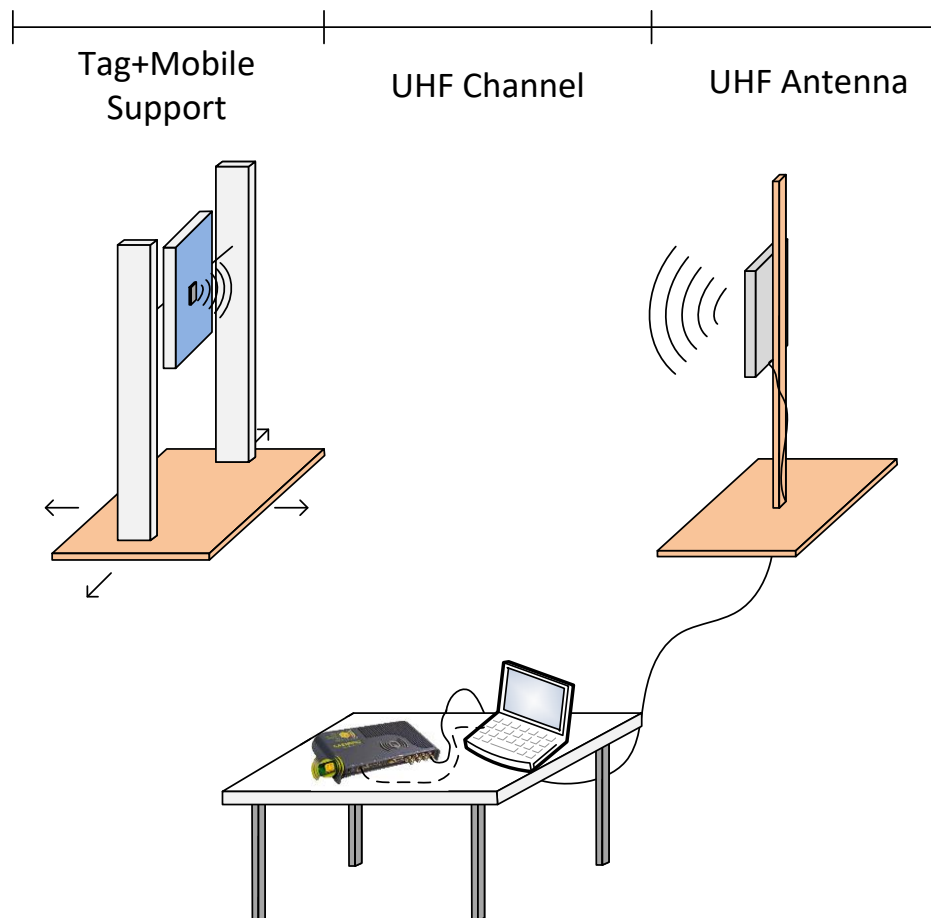


Figura 4 - 6. Set-up experimental

En la Figura 4 - 6 se puede observar cómo el *set-up* utilizado consta de un soporte móvil en el plano horizontal, en el que se instala la etiqueta RFID sobre una placa metálica de 45 x 15 cm², y una antena conectada al lector RFID, el cual, a su vez, se encuentra conectado al PC que lo controla y recoge los datos leídos.

RFID Pasivo

Las primeras pruebas realizadas estuvieron orientadas a localizar el rango de cobertura [4 - 4], pudiéndose observar cómo, para el caso en el que la potencia recibida en el *tag* está por encima del límite teórico (-10 dBm), dicho alcance está en unos 7m, empleándose una polarización vertical, y llegando a alcanzar hasta 9.5 m de alcance en algunos casos.

Otras pruebas estuvieron orientadas, no sólo a estudiar la capacidad de detectar la etiqueta RFID, sino a ubicarla en un entorno con múltiples *tags* (5 en el experimento realizado), evaluándose la detección de cada una de ellas. Los resultados obtenidos son los mostrados en la Tabla 4 - 7 [4 - 3].

Distancia (m)	<i>tags</i> Detectados
0,1	1, 2, 3, 4, 5
1	2, 3, 4, 5
2	2, 3, 4, 5
4	3, 4, 5
6,7	5

Figura 4 - 7. Lectura de múltiples *tags* pasivos

Finalmente, otra de las pruebas realizadas consistió en detectar el alcance del *tag* cuando la antena del lector y el propio *tag* no se encuentran alineados, tal y como se puede apreciar en la Figura 4 - 8.

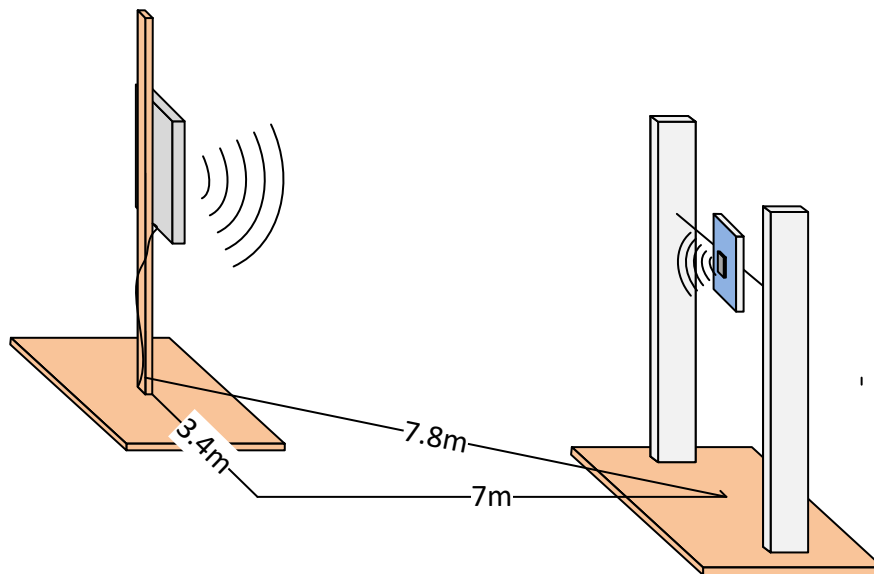


Figura 4 - 8. Medida de alcance con antena y *tag* no alineados

En este caso, el *tag* fue detectado a una distancia de 7.8 m con un desvío de la antena, respecto al *tag*, de 3.4 m.

RFID Activo

La primera prueba realizada para el caso de las etiquetas RFID activas consistió en evaluar el rendimiento de éstas en un entorno hostil, es decir, ubicadas conjuntamente sobre un plano metálico. Para ello se realizó una comparativa de su comportamiento en un entorno metálico y en otro no metálico, a una distancia de 7 m y a una altura de 1,5 m, evaluando el número de veces que el lector es capaz de detectarlas en un periodo de 3 segundos. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4 - 3 [4 - 3].

Etiqueta	Lecturas en entorno no metálico	Lecturas en entorno metálico
NT02	68	2
RT02	37	26
ZT02	37	30

Tabla 4 - 3. Comparativa entre entornos metálico y no metálico

Se puede observar cómo el caso del modelo NT02 es el más afectado por el entorno metálico, reduciéndose el número de lecturas en 3 s de 68 a tan solo 2. Los modelos *ruggerizados* (RT02 y ZT02) se ven mucho menos afectados, disminuyéndose su número de lecturas en entorno metálico de una forma mucho menos pronunciada, pasando de 37 a 26 y de 37 a 30, respectivamente. Por tanto el modelo NT02 es descartado para esta aplicación.

Una vez evaluado el rendimiento de las etiquetas activas en un entorno metálico, la siguiente tarea se centra en medir la máxima distancia a la que estas etiquetas (RT02 y ZT02) pueden ser leídas sobre el plano metálico. A partir de los resultados mostrados en la Tabla 4 - 4 [4 - 3], se puede observar cómo, en el caso de las etiquetas activas, el alcance es mucho mayor que en caso de las etiquetas pasivas.

Distancia Antena - Suelo (m)	Máximo Rango RT02 (m)	Máximo Rango ZT02 (m)
0	25	30
0.75	28	31
1.5	30	34

Tabla 4 - 4. Alcance de los tags activos

Tras la medida del alcance de las etiquetas activas, las siguientes pruebas se centraron en evaluar el rendimiento de las mismas en un entorno con múltiples etiquetas, donde pueden aparecer problemas de colisiones. En la Tabla 4 - 4 se puede observar cómo las etiquetas activas sufren menos problemas de colisiones. Esto es lógico si se enfoca desde el punto de vista de que los fabricantes de las etiquetas activas, normalmente, utilizan protocolos anticollisiones. Por ejemplo, para el caso de las etiquetas propuestas es posible leer más de 100 unidades simultáneamente. Sin embargo, éste no será un factor determinante en la aplicación planteada debido a que el caso más usual será aquél en el que se instala una única etiqueta por señal. Teniendo en cuenta esto, aunque existieran algunas excepciones donde se ubicaran varias etiquetas, los resultados de la Tabla 4 - 3 muestran que sería posible realizar la lectura de hasta 3 y 4 etiquetas pasivas ubicadas en una misma señal a una distancia del lector de hasta

4 y 2 m respectivamente. Otro elemento que refuerza este punto es el hecho de que un *tag* será leído más de una vez en el tiempo en que el vehículo se encuentra en el área de cobertura, tal como se demostrará en la sección 4.1.4.2.

Finalmente, es importante comentar que, para el caso de la etiqueta que ofrece mejor rendimiento, la ZT02, el número de lecturas decrece significativamente (menos de 3 lecturas/s) cuando la distancia horizontal entre el *tag* y la antena del lector es superior a 0.8m (configuración de la Figura 4 - 8), mientras que para el caso en el que se encuentran alineados la tasa es superior a 10 lecturas/s. En este sentido, es necesario destacar que las etiquetas pasivas eran detectadas para una distancia horizontal de hasta 3.4 m. Por tanto, teniendo en cuenta que el lector y su antena, instalados en un vehículo, se encontrarán a una distancia horizontal de la acera superior a 2 m, los beneficios de la tecnología RFID activa no se explotarían en su totalidad para esta aplicación.

4.1.4.1.3. Comparativa de resultados: selección de la tecnología

De las pruebas realizadas en las anteriores secciones se puede observar cómo la tecnología RFID activa cuenta con importantes ventajas sobre el caso de RFID pasivo, como una mayor sensibilidad que permite mayor distancia de alcance, aunque también cuenta con importantes inconvenientes o desventajas como los siguientes:

- Coste de los *tags* significativamente mayor (hasta un orden de magnitud).
- Necesidad de reemplazar las baterías, lo que implica mayores costes de mantenimiento.
- Alta probabilidad de interferencia con otras redes ISM (banda 2.4 GHz).
- Protocolos de comunicación propietarios.

Por el contrario, la utilización de la tecnología pasiva cuenta con una serie de ventajas añadidas:

- La distancia de alcance obtenida (7 m) es suficiente para la aplicación propuesta, tanto en carretera como en entornos urbanos, teniendo en cuenta que el identificador será leído a medida que el vehículo se acerca al *tag* a una velocidad de 50-100 Km/h (14-28 m/s), y la transmisión de datos se realiza a una tasa de 40 Kbps (según el estándar *EPC Global 1G2 ISO 18000-6C* [4 - 43]), lo que posibilita la lectura de hasta 400 *tags*/s.
- No es necesario contar con un protocolo anticollisiones complejo, debido a que se ha demostrado que es posible la lectura simultánea de un número de etiquetas mayor al que existirá en una misma señal de tráfico.

Por tanto, se puede concluir que las prestaciones de la tecnología activa sobreexceden las necesidades de esta aplicación, lo que implica unos sobrecostes que hacen que la tecnología pasiva sea la mejor opción para este marco de trabajo, en tanto que se trata de una solución más económica y basada en un estándar abierto.

4.1.4.2. Detección en movimiento: resultados de simulación

En este punto se evaluará la validez del radio enlace teóricamente modelado en la sección 4.1.3 a través de la siguiente metodología: primeramente se calculará el campo directo y reflejado por la etiqueta RFID usando las ecuaciones (4 - 9)-(4 - 12). Seguidamente, usando la ecuación (4 - 23), se calculará la probabilidad ($P_{downlink}$) de que la potencia recibida en el *tag* sea mayor que el umbral establecido. A continuación se repetirán los mismos cálculos para el enlace *tag*-lector (P_{uplink}) con el objetivo de obtener la probabilidad de éxito en esa dirección. Finalmente, si se asume que el éxito de la comunicación en un sentido y en otro son independientes, se puede obtener la probabilidad de éxito de la comunicación como $P_{coverage} = P_{downlink} \cdot P_{uplink}$.

Es importante comentar que en todos los estudios realizados se considera que el vehículo viaja a una velocidad constante y en línea recta, la altura de la antena es de 1.3 m respecto al suelo y la potencia radiada por el lector se fija a 2 W, de acuerdo con la normativa ETSI EN 302-208. La sensibilidad del

lector y de las etiquetas RFID pasivas se fija en -80 dBm (10^{-8} mW) y -10 dBm (0.1 mW), respectivamente, los cuales son valores realistas para ambos casos [4 - 44].

En las siguientes figuras [4 - 3], se puede observar, en rojo, la $P_{coverage}$ para distintos parámetros de diseño y distintas alturas de las etiquetas RFID pasivas ubicadas de las señales de tráfico (1, 1.25, 1.75 y 2 m respecto al nivel del suelo). Estas medidas se comparan con el caso en el que la etiqueta y la antena del lector se encuentran a una misma altura igual a 1.3m, el cual es usado como caso de referencia y representado en color negro.

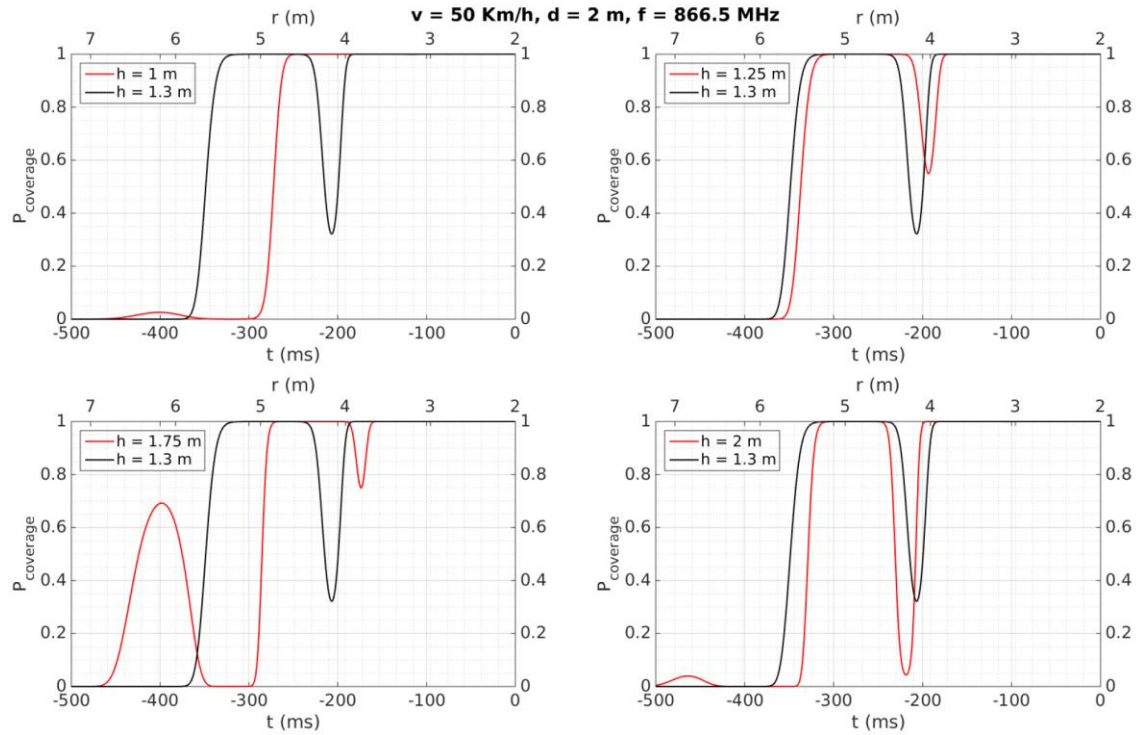


Figura 4 - 9. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz

En la anterior figura se puede observar cómo se fija una distancia de la señal de tráfico a la carretera de $d = 2$ m, la velocidad del vehículo a 50 Km/h y la frecuencia de señal a 866.5 MHz. Además, se asume que no hay interferencia multi-trayecto significativa, más allá de la señal reflejada en el suelo ($\sigma = 0.1r_{rms}$), y que la polarización, para maximizar la cobertura, es vertical.

Las figuras anteriormente representadas cuentan con dos ejes x: uno, en la parte inferior, representa el tiempo de necesario para la lectura de la señal de tráfico (etiqueta), comenzando en $t_0 = -0.5$ s y finalizando en $t=0$, y otro, en la parte superior, que representa la distancia con la señal de tráfico, siendo ésta $r=7$ m en el caso $t_0 = -0.5$ s y $r=d$ en el caso de $t = 0$ s. Estos ejes se utilizarán de la misma forma en las siguientes imágenes.

En este primer caso, se puede apreciar cómo la $P_{coverage}$ comienza a ser en torno a 1 sobre los 350 ms, en el caso de que la etiqueta y la antena estén alineadas (altura = 1.3 m), y sobre los 250 ms en el caso en el que la antena se encuentre ubicada a 1 m del suelo. Los resultados para el caso en el que $h = 1.25$ m son muy similares, mientras que $h = 1.75$ m representa el caso en el que aparecen *notches* o zonas de sombra debido a la interferencia multi-trayecto. Este efecto tiene menos impacto para alturas superiores, $h = 2$ m, en las que los resultados son similares al caso ideal (antena y tag a la misma altura).

No obstante, en todos los casos existen al menos 250 ms previos a alcanzar la señal de tráfico en los que $P_{coverage}$ es máxima independientemente de la altura. Por tanto, ya que la tasa de datos del

protocolo EPC Global 1G2 IXO 18000 6C es de 40 Kbps (400 *tags*/s, 2.5 ms por *tag*), podemos asegurar que el radioenlace será completamente fiable durante el tiempo de transmisión y que la etiqueta será leída alrededor de 10 veces durante el tiempo de paso del vehículo.

Por tanto, estos resultados permiten la detección de varias etiquetas simultáneas en la misma área de cobertura (unos 5 m en las simulaciones) durante el mismo tiempo de paso. Además, debido a que pueden aparecer varias etiquetas en el área de cobertura del lector, hay que tener en cuenta el tiempo necesario para gestionar las posibles colisiones. Este tiempo puede alcanzar los 25ms por colisión [4 - 45], lo que implicaría que el proceso de lectura ha de repetirse. No obstante, el tiempo de cobertura total, unos 250 ms según las imágenes anteriores, es suficiente para la correcta lectura de la etiqueta incluso existiendo colisiones.

En la siguiente figura ([4 - 3]), se asume que la velocidad del vehículo aumenta hasta 120 km/h. Si lo comparamos con las simulaciones anteriores se puede apreciar cómo las curvas han sido comprimidas temporalmente, contando en este caso con un tiempo de cobertura de unos 100 ms, por lo que la identificación en este caso también sería posible.

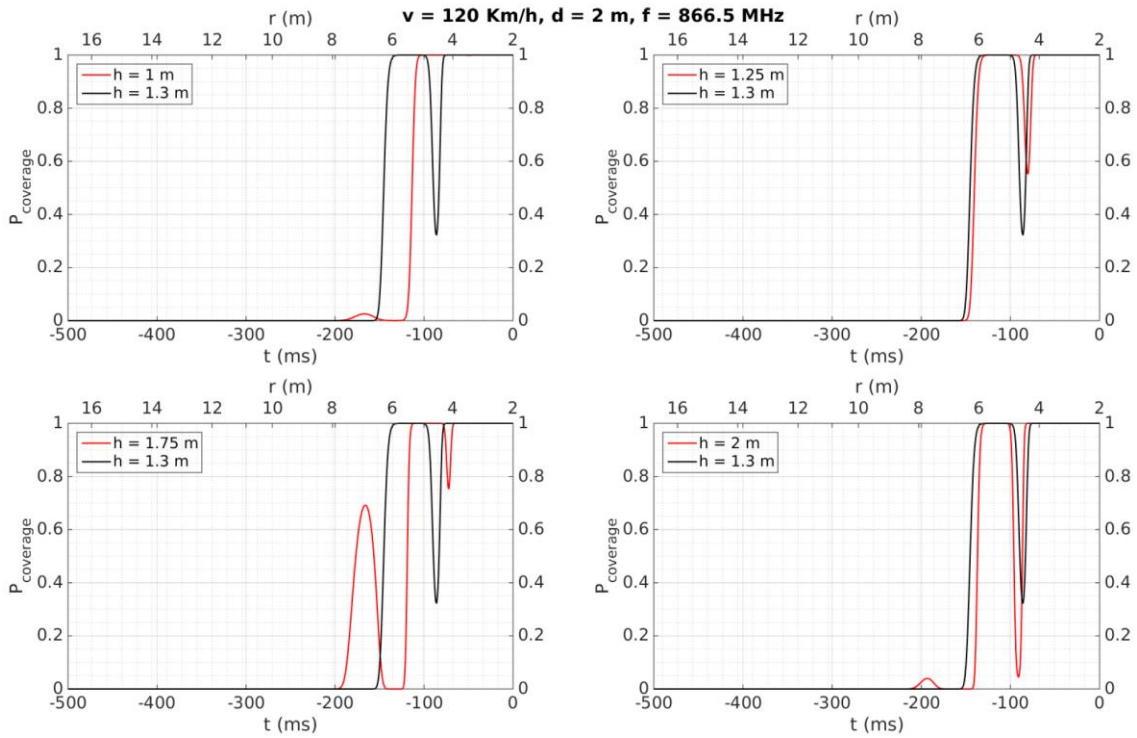


Figura 4 - 10. Simulaciones con $v=120$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz

En la Figura 4 - 11 y la Figura 4 - 12 ([4 - 3]) se representan casos similares a la Figura 4 - 9 y la Figura 4 - 10, respectivamente. La diferencia entre ellos consiste en un aumento de la distancia entre la etiqueta y la carretera de hasta 4m, reduciendo el tiempo de $P_{coverage} = 1$ a < 200 ms para una velocidad de 50 Km/h y a < 100 ms para 120 Km/h.

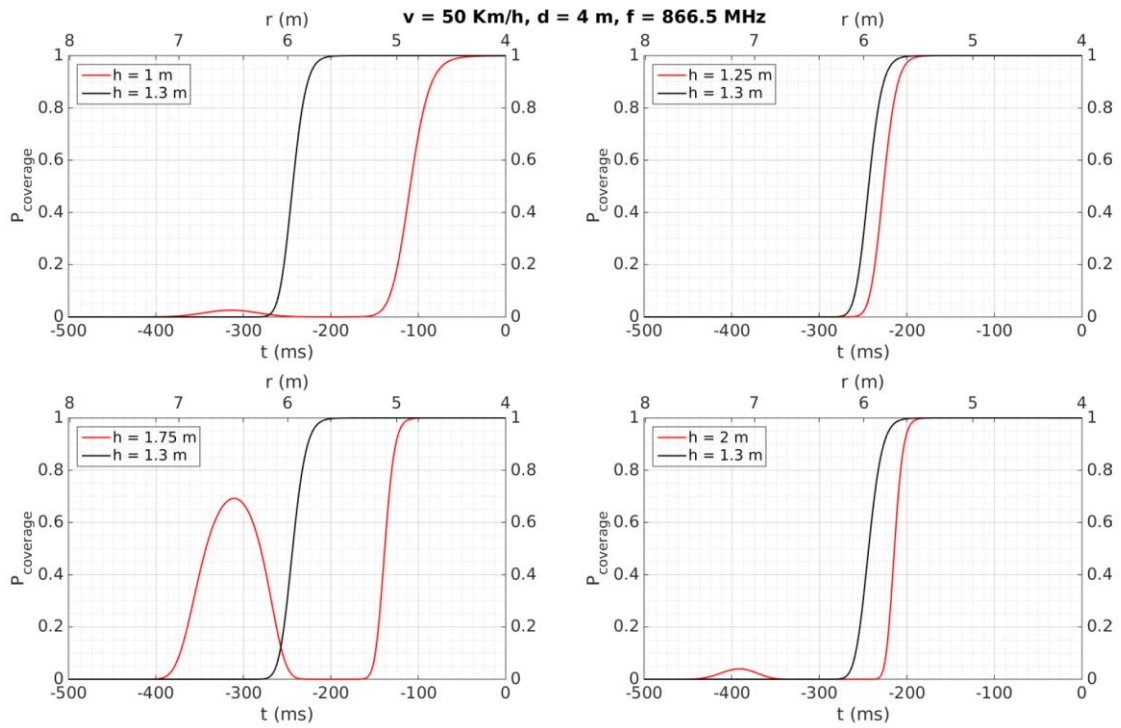


Figura 4 - 11. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=4$ m, $f=866.5$ MHz

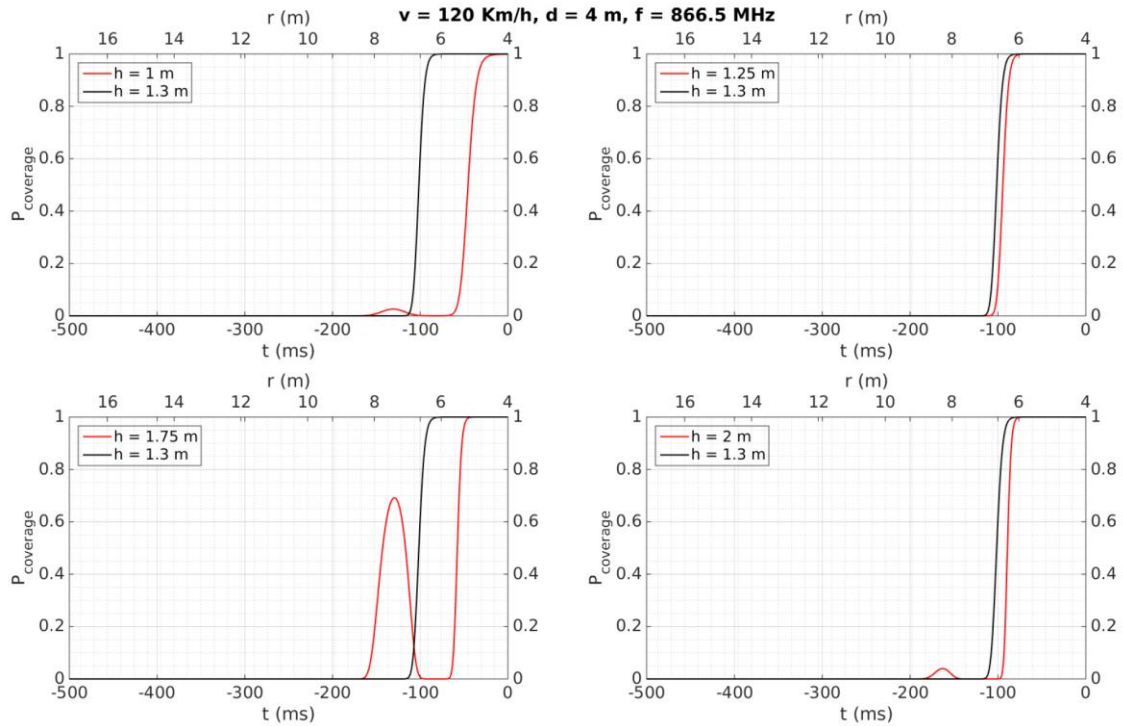


Figura 4 - 12. Simulaciones con $v=120$ Km/h, $d=4$ m, $f=866.5$ MHz

Por otro lado, la Figura 4 - 13 ([4 - 3]), muestra los resultados en un escenario con un número elevado de reflexiones multi-trayecto ($\sigma = r_{rms}$), y suponiendo una velocidad de 50 Km/h con el objetivo de representar fielmente un entorno urbano.

Se puede observar cómo, incluso para este caso, la $P_{coverage}$ alcanza valores muy próximos a 1 durante un periodo de, al menos, 100ms para todas las alturas consideradas en el estudio, lo que pone de manifiesto la correcta detección de las etiquetas incluso en un escenario urbano hostil como el representado.

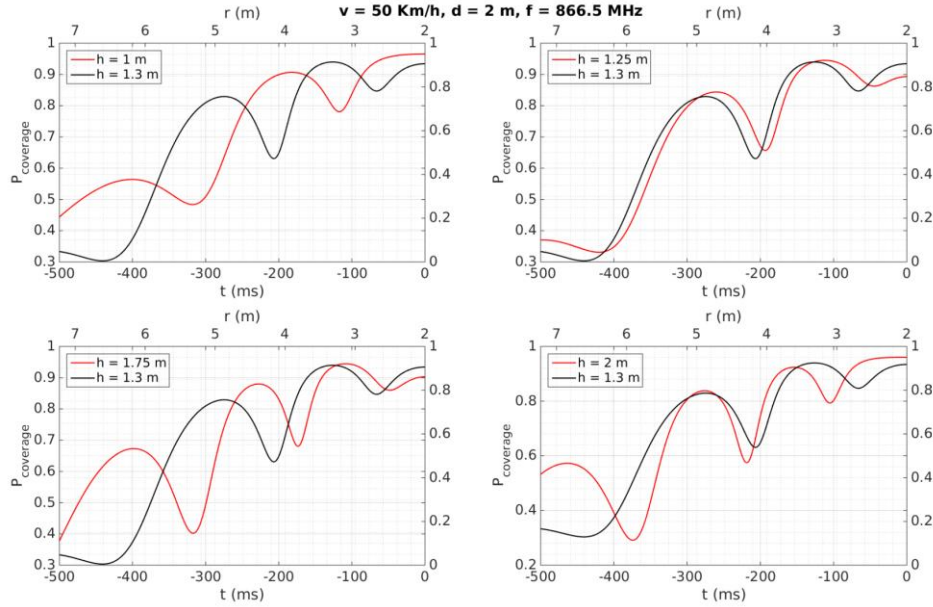


Figura 4 - 13. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=866.5$ MHz. $\sigma = \tau_{rms}$

Finalmente, la Figura 4 - 14 ([4 - 3]) muestra los resultados de simulación considerando una frecuencia de 2450 MHz y que no existe reflexión multi-trayecto (a excepción de la del suelo). Se puede observar cómo la $P_{coverage}$ es máxima en un periodo de tiempo mínimo que corresponde al momento en el que la antena está más próxima a la etiqueta, siendo un tiempo menor al requerido por el protocolo.

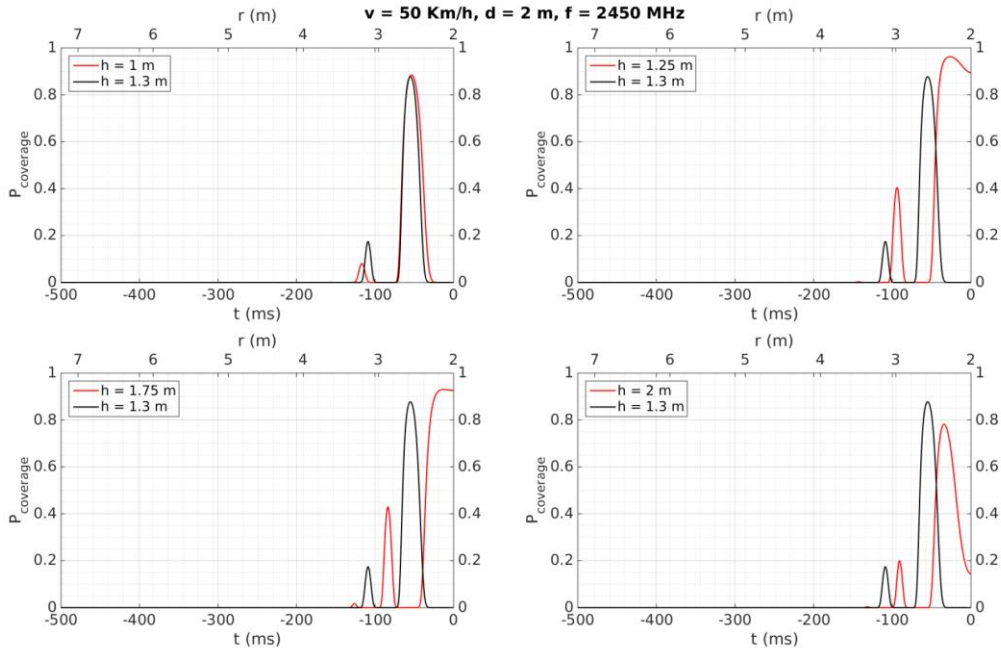


Figura 4 - 14. Simulaciones con $v=50$ Km/h, $d=2$ m, $f=2.45$ GHz

Por tanto, la anterior figura pone de manifiesto que la frecuencia de 866.5 MHz, utilizada por las etiquetas pasivas, es una opción mejor que la utilización de los 2.45 GHz que usualmente emplean las activas, para la que, además, la potencia de transmisión necesaria es mucho mayor. Se puede concluir, por tanto, que los resultados de las simulaciones realizadas validan las conclusiones desprendidas de la comparativa realizada en la sección 4.1.4.1.

4.1.4.3. Detección en movimiento: resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas realizadas en campo a las etiquetas pasivas, con la configuración detallada anteriormente en este capítulo. Para ello se instalan 3 etiquetas en una señal de tráfico a alturas de 1.28, 2.13 y 2.35 m, como se puede apreciar en la Figura 4 - 15 Izda. Por otro lado, la antena del lector es instalada a una altura de 1.5m respecto del suelo y orientada hacia las señales de tráfico, a través de la ventanilla delantera derecha del vehículo. Se puede apreciar en la Figura 4 - 15 dcha. la distancia d entre la señal de tráfico y la antena, la cual variará entre 2 y 4 m en los distintos experimentos.

Se puede observar que los resultados ofrecidos por las pruebas experimentales (Tabla 4 - 5 [4 - 3]) son satisfactorios a cualquier velocidad a la que viaje el vehículo, dentro de un rango que no afecte al tráfico, tal y como predijo las simulaciones. Además, la Figura 4 - 16 muestra la tendencia general a que el número de detecciones de los *tags* decrezca a medida que la velocidad del vehículo y la distancia d aumentan. En dicha figura, el campo representado como “*area type*” es 1 cuando el *tag* es ubicado sobre la señal metálica de tráfico y 2 cuando el *tag* es ubicado en el mástil metálico.

La Tabla 4 - 5 muestra que los *tags* son siempre detectados (se considera una detección exitosa cuando el número de lecturas de la etiqueta es, al menos, 2) en el caso en el que el vehículo viaje a una velocidad de 50 Km/h. También son detectadas para cualquier velocidad del vehículo cuando son ubicadas sobre la señal de tráfico (alturas de 2.13 y 2.35 m) incluso para distancias $d = 4$ m, lo que implica que el sistema trabajaría correctamente incluso en los casos en los que exista cierta distancia entre la señal y el vehículo, algo que puede ocurrir en el caso de carreteras de varios carriles. Por el contrario, por encima de 50 Km/h las etiquetas instaladas a una altura de 1.28 m no son detectadas a las distancias probadas (2 y 4 m). Esta mejora de rendimiento a las alturas de 2.13 y 2.35 m es debida, principalmente, a que el efecto de la reflexión multi-trayecto es menor a mayor altura y, por tanto, el rendimiento es similar al caso en el que la antena y la etiqueta están enfrentadas a la misma altura, tal y como se predijo en la sección 4.1.4.2. Además, se puede deducir que el rendimiento es peor cuando la altura de la etiqueta es menor que a la altura de la antena del lector, lo cual se puede observar también en las simulaciones representadas (Figura 4 - 9 a Figura 4 - 14) para el caso $h = 1$ m, donde es necesario un tiempo mayor para alcanzar $P_{coverage} = 1$, siendo este efecto aún más pronunciado a velocidades elevadas.

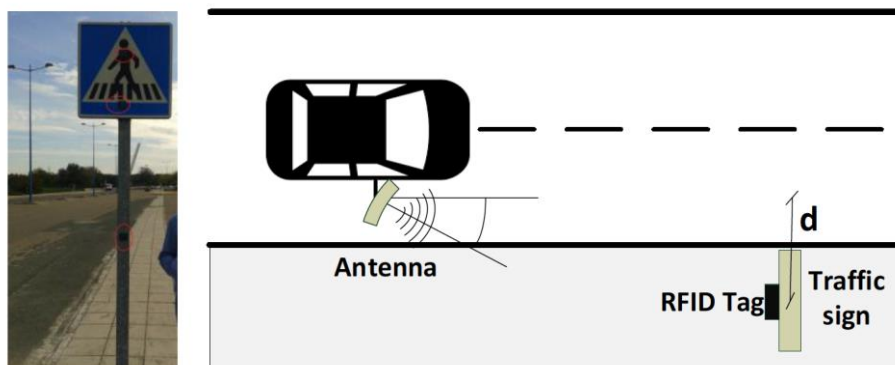


Figura 4 - 15. Tags sobre la señal de tráfico (izda.). Set-up de las pruebas (dcha.)

Velocidad (Km/h)	Distancia d (m)	Altura señal (m)	Detección	# Detecciones
50	2	1.28	Sí	2
50	4	1.28	Sí	2
50	2	2.13	Sí	3
50	4	2.13	Sí	3
50	2	2.35	Sí	4
50	4	2.35	Sí	3
65	2	1.28	No	1
65	4	1.28	No	0
65	2	2.13	Sí	3
65	4	2.13	Sí	2
65	2	2.35	Sí	3
65	4	2.35	Sí	3
80	2	1.28	No	0
80	4	1.28	No	0
80	2	2.13	Sí	3
80	4	2.13	Sí	2
80	2	2.35	Sí	2
80	4	2.35	Sí	2

Tabla 4 - 5. Resultados en movimiento

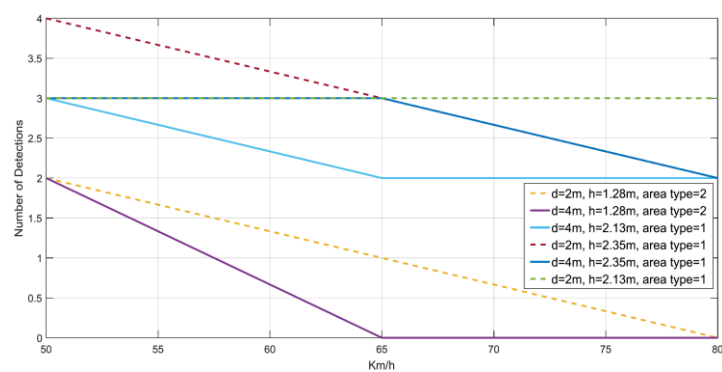


Figura 4 - 16. Número de detecciones en cada caso

Además de lo comentado anteriormente, se puede explicar el mejor rendimiento de las etiquetas cuando éstas son instaladas a mayor altura por el hecho de que son instaladas sobre la propia señal de tráfico, lo que implica que el área metálica sobre el que se apoyan es mayor, incrementando, por tanto, el plano de tierra para la etiqueta RFID y mejorando así el rendimiento de la misma [4 - 46].

No obstante, para el caso urbano, donde las etiquetas pueden estar instaladas en elementos más pequeños, también se garantiza su detección, en tanto que la Tabla 4 - 5 refleja cómo, para velocidades de 50 km/h (normalmente la máxima en entornos urbanos), las etiquetas fueron detectadas estando instaladas sobre el mástil de las señales. Además, este hecho corrobora la posibilidad de extender el sistema a aplicaciones de inventario de instalaciones urbanas, incluso para el caso donde varias etiquetas estén ubicadas muy próximas entre sí.

4.1.5. Comparativa con otros sistemas similares

Aunque en la sección 4.1.1 ya se hizo una comparativa entre distintos sistemas, lo cierto es que las características y la naturaleza de la aplicación para la que está diseñado cada uno son muy dispares, por lo que, con el fin de realizar una comparativa aplicada al inventario de carreteras, en la siguiente tabla se resaltan de una manera más concisa los beneficios ofrecidos por la tecnología y la arquitectura seleccionadas para el inventario de carreteras.

	[4 - 12]	[4 - 13]	[4 - 14]	[4 - 15]	Este desarrollo [4 - 3]
Tecnología	Pasiva	Activa	Activa	Activa	Pasiva
Aplicación	Señalización de tráfico en vehículo	Señalización de tráfico en vehículo	Señalización de tráfico en vehículo	Controlador de velocidad	Inventario y localización
Frecuencia (MHz)	13.56	2400-2483	867	433	866.5
Rango de lectura medio (m)	0.4	30	10	23	7
Velocidad del vehículo (km/h)	<20	<100	<90	<24	<80
Tamaño <i>Tag</i> ID	64	24	192	-	96
Precio/ <i>tag</i> (US\$)	1.31	-	20	oct-20	3.3
Tasa de lectura (<i>tags/s</i>)	50000	10000	-	-	400000
Tasa de datos (Kbps)	3.2	250	-	-	40
Área del <i>Tag</i>	76x45	-	80x40	123x80	51.5x47.5

Tabla 4 - 6. Comparación entre sistemas RFID para detección de señales de tráfico

Tal y como se puede apreciar, tan solo [4 - 12] y el trabajo desarrollado en este capítulo utilizan tecnología RFID pasiva. Sin embargo, [4 - 12] basa su implementación en el uso de etiquetas de corto alcance, no *ruggerizadas* y no diseñadas para aplicaciones en entornos metálicos. Esto es debido a que estas etiquetas son ubicadas en la carretera en lugar de en las señales de tráfico, no siendo aptas para el inventario de éstas. Además, estas etiquetas pueden ser usadas únicamente cuando la velocidad del

vehículo es inferior a 20 Km/h, lo que, en el caso del inventario de carreteras interferiría en el flujo normal del tráfico. Por último, aunque son etiquetas muy baratas, es necesario destacar que en la aplicación desarrollada en [4 - 12] se utilizan hasta 3 etiquetas para cada punto de señalización. De hecho, en [4 - 25] se presenta una mejora del sistema [4 - 12] con el objeto de reducir el número de *tags* empleados.

En lo que a sistemas RFID activos se refiere [4 - 13]-[4 - 15], se puede observar que, como se ha demostrado previamente, presentan un alcance significativamente mayor que las etiquetas RFID pasivas. No obstante, es necesario destacar que el alcance ofrecido por éstas es suficiente para la aplicación en la que son empleadas, lo que permite beneficiarse de las ventajas que la tecnología RFID pasiva presenta, tales como el coste, el tamaño del *tag*, la no necesidad de utilizar baterías y, por tanto, no tener costes de mantenimiento, etc.

Por otro lado, en [4 - 15] se propone la utilización de dos lectores RFID en lugar de uno, como sistema de redundancia, posibilitando así leer etiquetas que, en el caso de tener sólo uno, podrían no haberse leído. En este sentido, el sistema presentado en este capítulo también posibilita esta característica, pudiendo instalar hasta 4 antenas distintas, orientadas en distintas direcciones para maximizar el área de cobertura, lo cual es especialmente importante en aquellas carreteras en las que existe señalización a ambos lados, que son la mayoría de las existentes, si tenemos en cuenta tanto carreteras de un solo sentido como de doble sentido, para las que se podrían inventariar las señales de ambos lados sin necesidad de recorrer dichas carreteras en ambos sentidos.

De la misma forma, la utilización de varias antenas se podría aplicar a la lectura de señales de tráfico ubicadas sobre la carretera. No obstante, este caso no entra en el alcance de este sistema y no ha sido validado, aunque puede plantearse como un trabajo a futuro. Sin embargo, se puede adelantar que, en este caso, no existiría el efecto de las reflexiones multi-trayecto y las etiquetas estarían instaladas en señales de gran tamaño, por lo que, en base a las conclusiones desprendidas de este trabajo, el rendimiento de las etiquetas mejoraría, por lo que dicha situación se presentaría como un escenario más favorable.

Por otro lado, en lo que a características físicas se refiere, la etiqueta seleccionada presenta, en la mayoría de los casos, el menor tamaño físico y el ID con mayor capacidad, lo que facilita las tareas de inventariado y localización, permitiendo, además, una posible extensión del sistema a su aplicación, por ejemplo, en entornos urbanos. Prueba de ello es que los trabajos presentados en [4 - 12]-[4 - 15] y [4 - 27] podrían ser implementados sobre el sistema propuesto. Además, una característica muy importante es la utilización de un estándar de comunicación abierto, lo cual posibilita seguir utilizando las etiquetas ya instaladas en caso de una evolución de la tecnología de los lectores existentes, evitando tener que actualizar los *tags* desplegados.

En general, analizando la Tabla 4 - 6, se puede concluir que la viabilidad de utilizar el sistema desarrollado para la aplicación deseada ha quedado demostrada, habiéndose cumplido los requisitos iniciales del sistema, surgidos a partir de los desafíos que presenta la aplicación, tal como es el alcance de la tecnología RFID pasiva para aplicaciones en movimiento. Además, en comparación con [4 - 12], que utiliza RFID pasivo, se observa una mejora del rendimiento del sistema, la cual depende, en gran medida, del equipamiento utilizado.

Por último, se ha realizado también una comparativa con sistemas que utilizan tecnología RFID pasiva (Tabla 4 - 7), que trabajan en la misma banda de frecuencia, y que utilizan versiones similares de los protocolos de comunicación, aunque la aplicación en estos casos no es exactamente la misma [4 - 22]-[4 - 26].

	[4 - 22]	[4 - 23]	[4 - 24]	[4 - 25]	[4 - 26]	Este Desarrollo
Aplicación	Localización de vehículos	Identificación de vehículos	Identificación de vehículos	Localización de vehículos	Identificación de vehículos	Inventario y localización
Frecuencia (MHz)	870	923	860-960	902.75-927.25	900-920	866.5
Rango de lectura medio (m)	0.5	4	10	0.8	0.5	7
Velocidad del vehículo (Km/h)	<128	<300	<90	<1.8	<100	<80

Tabla 4 - 7. Comparativa entre sistemas similares basados en RFID pasivo

En primer lugar, se puede apreciar cómo algunas características que sí que aparecen en la Tabla 4 - 6 no aparecen en la Tabla 4 - 7. Las razones son las siguientes:

- Tamaño del *Tag* ID: se trata de un valor que no es ofrecido por los artículos de referencia. Tan sólo se ha podido saber, a partir de los cálculos y simulaciones presentados en algunos de estos trabajos, que [4 - 23] y [4 - 26] utilizan el máximo tamaño provisto por el estándar (512 bits).
- Precio por *Tag*: de nuevo, los artículos de referencia no ofrecen esta información. En cualquier caso, debido a que se trata de etiquetas para la misma banda de frecuencia, mismo estándar y que también son *ruggedizadas*, se puede suponer que el precio de éstas es similar al del sistema propuesto.
- Tasa de datos: tan sólo [4 - 22] y [4 - 23] proporcionan los datos de 100 *tags/s* y 62.5 *tags/s*, respectivamente.
- Tamaño de las etiquetas: este dato tan sólo es proporcionado por [4 - 25], en el que las etiquetas tienen unas dimensiones de 98 x 12 mm². En principio, debido a que el resto de sistemas utilizan la misma tecnología, podemos asumir que los tamaños serán similares.

En lo que al análisis de esta comparativa se refiere, se puede observar cómo el trabajo propuesto ofrece un alcance superior al resto de los presentados, lo cual viene determinado por el hecho de que el resto de los trabajos están enfocados a localizar múltiples etiquetas en las carreteras, con el objetivo de lograr una buena precisión en cuanto a localización ([4 - 22][4 - 25]) o en cuanto a identificación de vehículos ([4 - 23][4 - 24][4 - 26]). En otras palabras, en las aplicaciones para las que están desarrollados, no se contempla como requisito la lectura de etiquetas a grandes distancias. Por otro lado, [4 - 24] cuenta con 10 m de alcance para velocidades de hasta 90 Km/h (a nivel de simulación), mientras que [4 - 26] logra un alcance de 6 m (a nivel teórico), lo que es similar al sistema presentado.

En lo que a la velocidad del vehículo se refiere, se puede observar cómo [4 - 25] alcanza valores muy bajos debido a que este trabajo está orientado a minimizar el error de posicionamiento de vehículos en interiores (<1.35 cm), mientras que [4 - 22]-[4 - 24] y [4 - 26] sí alcanzan altas velocidades a nivel teórico y de simulación. En el caso del trabajo que se presenta en este capítulo, a nivel de simulación, se consigue detectar etiquetas a 120 Km/h (Figura 4 - 10 y Figura 4 - 12), lo que está en el orden de magnitud del resto de sistemas. Por tanto, comparando este trabajo con los anteriormente referenciados, se puede concluir que se trata de un sistema novedoso, cuya principal diferencia respecto a los anteriores es su aplicación para inventario de señales de tráfico. Dicha aplicabilidad ha sido validada, tanto a nivel de simulación como experimental, resultando un sistema apto para la detección de etiquetas a larga distancia y circulando a altas velocidades.

4.1.6. Conclusiones

En este apartado se ha presentado un sistema de inventario de señales de tráfico, inalámbrico, de bajo coste y basado en la utilización de la tecnología RFID pasiva. El sistema presentado, además de ser apto para inventario en carreteras, es perfectamente adaptable al inventario de instalaciones urbanas, para las que pueden presentarse escenarios más hostiles y de baja visibilidad, y para los que los sistemas basados en el procesamiento de imagen ofrecen un rendimiento y una fiabilidad más reducidos.

El sistema propuesto ofrece una base de datos auto-contenida y auto-actualizada, la cual posibilita el escalado del sistema con facilidad, al mismo tiempo que reduce el tiempo y el coste del inventario en carreteras respecto a los métodos tradicionalmente empleados. Adicionalmente, el sistema propuesto no afecta al tráfico existente en las vías bajo proceso de inventario. Además, la infraestructura desplegada para el inventario puede ser aprovechada para implementar sistemas de navegación basados en los EPC de los propios *tags*, mapeándose sus identificadores con las coordenadas georreferenciadas de cada uno de ellos.

Dado que el rendimiento de la tecnología RFID pasiva en movimiento no está garantizado a priori, se ha desarrollado un modelo teórico del radioenlace entre el lector y las etiquetas, el cual ha sido validado, primeramente con una batería de simulaciones y, posteriormente, con una serie de pruebas experimentales. Tanto el modelo teórico, como las simulaciones y las pruebas de campo han ofrecido resultados análogos, proporcionando las especificaciones finales del sistema en cuanto al alcance del radioenlace, a los límites de velocidad establecidos para leer correctamente las etiquetas y a la ubicación de los *tags* en las señales de tráfico.

De este modo, los resultados ofrecidos han permitido validar la tecnología RFID pasiva para la aplicación propuesta, así como para ampliaciones de la misma, como pueden ser el inventario de mobiliario urbano, la asistencia a la conducción o las comunicaciones I2V.

4.2. Sistema y método de monitorización del estado de correas de ascensores basados en reflectometría y técnicas de *compressive sensing*

En esta sección se lleva a cabo la investigación y desarrollo de la aplicación de técnicas TDR (*Time Domain Reflectometry*) para el diagnóstico de las correas de los ascensores, empleándose para mejorar la resolución espacial de la localización de los fallos detectados. Por otro lado, también se investiga el uso de técnicas basadas *compressive sensing* (CS), con el objetivo adicional de minimizar la cantidad de datos transferidos al procesador central y, por tanto, facilitar la integración del sistema en el paradigma IoT. De este modo, usando la capacidad de cálculo ofrecida por las capas de alto nivel de la arquitectura IoT, se realiza el procesamiento necesario para determinar el estado de salud de dichas correas.

4.2.1. Introducción y estudio del estado del arte

Hoy día, existe una tendencia continua a mejorar la seguridad, eficiencia y autonomía del equipamiento industrial, lo que hace que las líneas de investigación se centren en nuevos diseños de sistemas de monitorización de bajo coste y bajo consumo energético que cuenten con monitorización en tiempo real y detección de fallos no destructiva para implementar un mantenimiento predictivo del propio equipamiento o de las instalaciones [4 - 47].

La industria de ascensores, como no puede ser de otra forma, también es parte de esta tendencia y está sustituyendo paulatinamente los tradicionales cables metálicos por correas de varios hilos de acero con recubrimiento de poliuretano debido a su mayor resistencia a la abrasión, mayor vida útil y bajo nivel de ruido. Con la introducción de estas nuevas correas surge la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de monitorización de la salud de las mismas que permitan la operación segura del ascensor. Idealmente, dichas técnicas deberían de detectar el daño en una fase temprana de degradación y localizar el mismo para una rápida evaluación y reparación.

El sistema propuesto en esta sección es una solución para monitorizar en tiempo real y de forma continua la integridad de los hilos de acero de correas de ascensores. Más concretamente, la solución propuesta permite determinar anticipadamente la degradación de las correas y la localización espacial del fallo con alta precisión. El método es válido para correas formadas por varios hilos metálicos y un recubrimiento protector aislante (habitualmente de poliuretano, poliamida, nylon o una mezcla de ellos). El método es válido para cualquier configuración y número de hilos de acero dentro de la correa y puede implementarse mediante sistemas de muy bajo coste.

Antes de continuar con el desarrollo de la solución propuesta, se comentan diversas tecnologías utilizadas para determinar la salud de las correas de ascensores:

- Un método empleado tradicionalmente para la monitorización de defectos en cables y correas de ascensores es el basado en medidas del campo electromagnético, concretamente el que emplea la tecnología MFL (*Magnetic Flux Leakage*). Para llevar a cabo dicho método se magnetiza el acero de los cables y se identifican zonas con corrosión o pérdidas de metal detectando fugas del campo magnético. Sin embargo, el uso de MFL presenta algunas dificultades debido al pequeño diámetro de los cables metálicos y a la atenuación provocada por el aislante de poliuretano [4 - 48]. Dichos efectos hacen que el sistema sea muy complejo y costoso para la industria [4 - 49].
- Otro de los métodos utilizados por los sistemas existentes es la medida de resistencia eléctrica de los cables de acero. La existencia del recubrimiento aislante permite realizar medidas de cada uno de los hilos por separado, o establecer conexiones en las terminaciones que permiten considerar conjuntamente la impedancia de varios hilos. Existen diferentes invenciones que

utilizan la medida de resistencias para determinar la salud de la correa. Por ejemplo, la patente de invención [4 - 49] utiliza un puente de impedancias y una excitación externa para mejorar la sensibilidad, compensando interferencias, ruido y variaciones mecánicas. Existen otras soluciones basadas en medida de resistencia eléctrica, como la invención [4 - 50]. Estas técnicas están muy limitadas respecto a la sensibilidad de detección y no permiten la localización de fallo.

- Por último, existen métodos basados en procesamiento de imágenes en tiempo real [4 - 51]. Estas técnicas son más apropiadas para los cables de ascensor tradicionales, ya que en las correas el aislante de poliuretano podría ocultar daños en los hilos de acero. Por otro lado, presenta una gran complejidad a nivel electrónico y de computación.

En esta sección se propone como alternativa a las tecnologías tradicionales, el uso de técnicas basadas en reflectometría. Dichas técnicas se clasifican en diferentes grupos atendiendo al dominio en el que se realiza la detección, distinguiéndose reflectómetros basados en el dominio del tiempo (TDR), frecuencia (FDR), tiempo-frecuencia (TFDR), ruido (NDR), espectro extendido (SSDR) o espectroscopia de impedancias (IS). Otra característica importante de las técnicas de reflectometría es la naturaleza de la onda incidente, siendo la generación de una señal pulsada (para el caso de TDR) la opción menos compleja. Así mismo, el coste del equipamiento de los sistemas TDR es sensiblemente más bajo, al evitar el uso de generadores de ondas arbitrarias (AWG), acopladores, mezcladores y procesadores digitales para implementar la FFT de la señal, los cuales son necesarios en el caso de emplear reflectómetros en el dominio de la frecuencia. La menor complejidad del equipamiento necesario en los sistemas TDR reduce, además del coste, el tamaño del sistema, lo cual es un requisito fundamental para aplicaciones en ascensores, debido al reducido espacio disponible.

Dado su bajo coste, complejidad y tamaño, en comparación con otros sistemas basados en reflectometría, en la presente solución se propone un sistema basado en TDR. Adicionalmente, los reflectómetros TDR presentan ventajas adicionales, tales como su capacidad para detectar el tipo de fallo o la de una mayor capacidad de localización espacial de fallos en comparación con las técnicas en el dominio de la frecuencia.

En lo que al principio de funcionamiento se refiere, los sistemas TDR se basan en la medida del retraso (o eco) de una señal eléctrica, permitiendo calcular la distancia desde el origen de la excitación hasta el punto en el que se produce la reflexión. De este modo, cuando existe un defecto se produce una discontinuidad en la impedancia del cable, provocando que reflexiones de los pulsos transmitidos aparezcan en el punto de generación de la señal original. Dado que se conoce la velocidad a la que viaja la señal por el cable, al conocerse a priori el material del que está fabricado, se podrá calcular la distancia a la que se ha producido la variación de impedancia midiendo el tiempo que ha transcurrido desde que la señal aparece como entrada hasta que aparece reflejada.

Un ejemplo de la utilización de los sistemas TDR para la detección y localización de fallos puede encontrarse en la invención [4 - 52]. No obstante, estos sistemas basados en TDR basan sus capacidades de localización espacial del fallo en el empleo de convertidores analógico-digital de alta frecuencia de muestreo (del orden de GHz), lo que encarece enormemente el coste de cada nodo de monitorización. Con el objetivo de incrementar dicha resolución espacial y aún conservar las ventajas en cuanto a simplicidad y bajo coste de los sistemas TDR, la presente solución propone el empleo de técnicas basadas en *compressive sensing*, con el fin de conseguir tasas de muestreo equivalentes del orden de GHz a partir del empleo de electrónica de bajo coste y consumo para cada uno de los nodos sensores instalados. Por otro lado, las técnicas de *compressive sensing* minimizan el número de datos transferidos al procesador central del sistema de monitorización, el cual está a cargo del mayor coste computacional necesario para la recuperación de la señal original. De este modo, se consiguen resoluciones espaciales del orden de cm, similares a las conseguidas por otros sistemas TDR para inspección de fallos en cables, tales como las presentadas por [4 - 53], donde se emplea equipamiento

del orden de GHz para cada nodo sensor, lo cual supone un alto incremento del coste total para el caso de los sistemas de monitorización distribuidos.

4.2.2. Descripción del sistema y aspectos de implementación

El método propuesto permite que cada nodo sensor instalado en su respectivo ascensor realice la detección del fallos con unos bajos requerimientos en cuanto a consumo y coste, mientras que la localización espacial se llevará a cabo de manera exacta a partir de la implementación de un muestreo aleatorio basado en técnicas de *compressive sensing*, lo cual se detalla en la sección 4.2.4. De este modo, la recuperación de la señal original será efectuada por un único procesador central, en el cual residirá la mayor carga computacional requerida para este proceso de recuperación.

El sistema propuesto se compone de un sensor instalado en el interior del ascensor, comprendido a su vez por dos resistencias de valor variable, la interconexión de al menos cuatro cables de la correa para su modelado como una línea de transmisión, y un microprocesador de bajo coste que implementará las funciones de generación de pulso, ajuste de impedancias, muestreo de la señal reflejada y detección del fallo producido, tal y como se muestra en la Figura 4 - 17.

El comportamiento de los hilos metálicos de la correa como línea de transmisión es muy dependiente de la instalación del ascensor, por lo que hace necesario una calibración inicial del sistema. Para ello, el sistema generará un pulso de ancho suficiente para poder ser muestreado por el convertidor analógico-digital de bajo coste. A partir de la detección del pulso reflejado debido a la desadaptación de impedancias inicial se irá variando progresivamente el valor de la resistencia de entrada y de la resistencia de carga, con el objetivo de minimizar la amplitud del pulso reflejado.

Una vez calibrado el sistema, se monitorizará el estado de la correa, comparando periódicamente la señal recibida con la señal original correspondiente al sistema calibrado

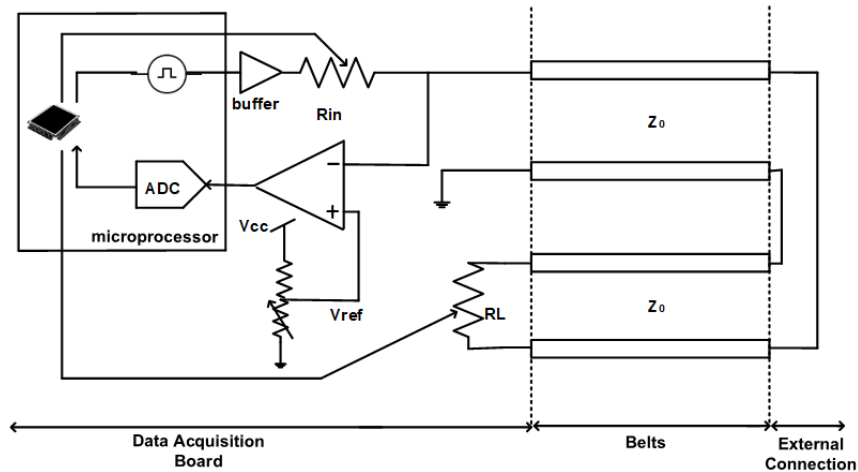


Figura 4 - 17. Descripción del sistema

El funcionamiento del TDR consiste en transmitir a través de un par de cables (los que están siendo analizados) una señal pulsada en tensión. Dicho pulso será reflejado al encontrar a su paso una discontinuidad en la impedancia, la cual se define usando el coeficiente de reflexión ρ [4 - 54]:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (4 - 24)$$

Donde Z_L es la impedancia de carga de la discontinuidad y Z_0 es la impedancia característica del medio de transmisión, la cual viene dada por:

$$Z_0 = (\eta_0 / \pi \sqrt{\epsilon_r}) \cosh^{-1}(D/d) \quad (4-25)$$

donde η_0 es la impedancia característica en espacio libre (377Ω), ϵ_r es la permitividad relativa del dieléctrico, D es la distancia entre los centros de ambos cables y d su diámetro. En base a esto, la distancia desde el punto de generación al fallo detectado (discontinuidad encontrada) se puede calcular como $l = t \cdot v/2$, donde t es el intervalo de tiempo que emplea la señal reflejada en viajar desde el punto de interés al origen y $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ es la velocidad de propagación de la onda reflejada, donde c es la velocidad de propagación de la luz.

El sistema diseñado ha sido optimizado para conectar una correa o estructura de cables de acero de tipo CSB (*Coated Steel Belt*), aislados por una serie de materiales como poliuretano, poliamida, nylon, etc. [4 - 48], debido a que se trata de la tecnología de fabricación más empleada hoy día en los ascensores. Las pruebas de validación de este desarrollo se han llevado a cabo sobre una correa de 10 hilos.

Tal y como se puede observar en la Figura 4 - 17, cada línea de transmisión evaluada es implementada sobre 4 hilos, los cuales son conectados por sus extremos dos a dos, a los que se les añade una impedancia de carga variable. Todos estos elementos son montados sobre un PCB, cuyo esquemático se describirá parcialmente a continuación.

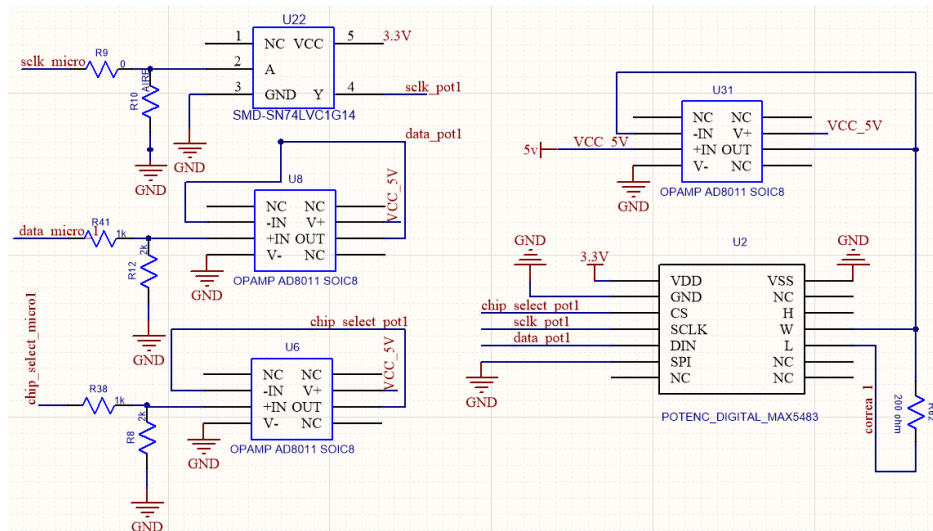


Figura 4 - 18. Esquemático de la etapa de control digital de impedancias

A modo de ejemplo, el esquemático presentado en la Figura 4 - 18 muestra la circuitería necesaria para implementar el control de los potenciómetros digitales con los que se ajustarán, de forma automática, las impedancias de entrada y de carga de cada línea de transmisión. Así, los elementos que se incluyen son los siguientes:

- Amplificadores operacionales (U31, U8 y U6) modelo AD8011 de Analog Devices, configurados como seguidor de tensión, haciendo las veces de buffer de salida para las diferentes señales generadas.
- La salida del seguidor de tensión se conecta al potenciómetro digital de entrada (U2) modelo MAX5481 de Maxim, del cual se destacan las siguientes características:
 - Potenciómetro de $10 \text{ K}\Omega$.
 - Alimentación 3.3 V proporcionada por un divisor de tensión incorporado en el diseño.
 - Interfaz SPI (*chip select* – CS –, reloj – SCLK –, y entrada de datos - DIN), controlada directamente desde el microcontrolador.

- 10 bits de resolución, lo que equivale a una resolución de 10 ohmios.
- Inversor Schmitt-Trigger modelo SN74LVC1G14 de Texas Instruments, el cual se utiliza para la señal de reloj del SPI (SCLK).

Por otro lado, en la Figura 4 - 19, se muestra la etapa del amplificador de instrumentación emplazado a la entrada del ADC del microprocesador.

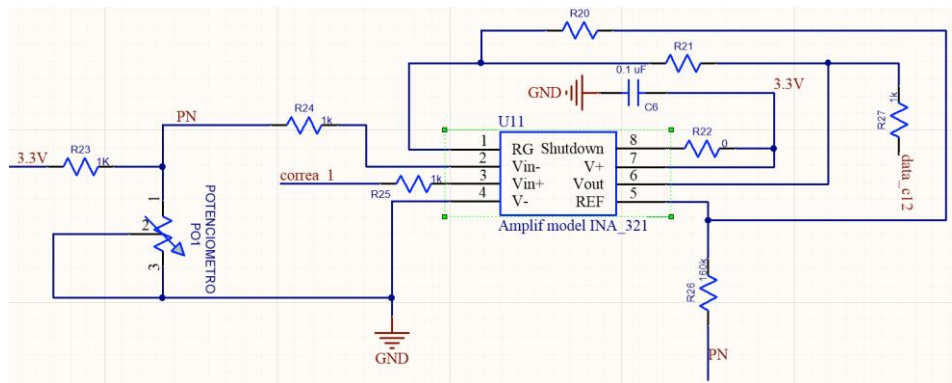


Figura 4 - 19. Interfaz de entrada al ADC

El amplificador seleccionado para la medida de las señales existentes en la correa es el INA321E de Texas Instruments, el cual cuenta con las características detalladas en la Tabla 4-8.

Parámetro	Valor	Unidad
CMRR	80	dB
Ib ⁹	0,5	pA
Ios ¹⁰	0,5	pA
Ruido (1 KHz a 10 Hz)	100-500	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ganancia	5	-
Slew-rate	0,4	V/ μs
Corriente de alimentación	40	μA

Tabla 4 - 8. Características principales del amplificador INA321E

Adicionalmente, el diseño electrónico de la tarjeta de adquisición de datos incluye al microcontrolador empleado (modelo STM32F103RD) y a los periféricos necesarios (SPI y UART), así como a otros elementos necesarios como son la alimentación alternativa por baterías, el WatchDog, el RTC, los buses I2C y JTAG, y los conectores necesarios.

9 Bias Current.

10 Offset Current.

A nivel de implementación física, el PCB diseñado, con unas dimensiones de 13.9 x 12.2 cm², y fabricado empleando dos capas de metal y dieléctrico FR-4, resulta como el ilustrado en la siguiente figura:

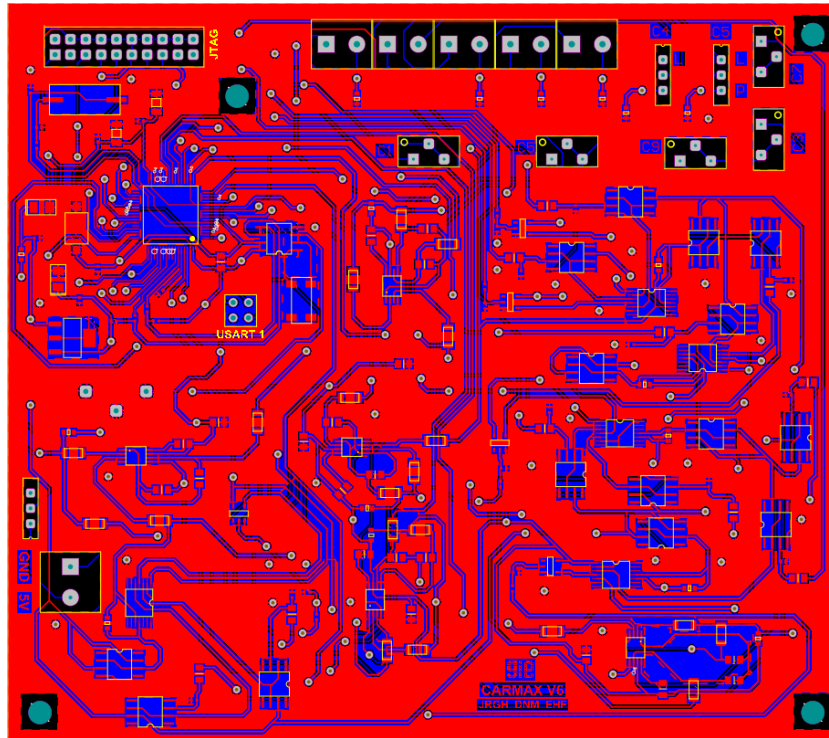


Figura 4 - 20. PCB del reflectómetro diseñada

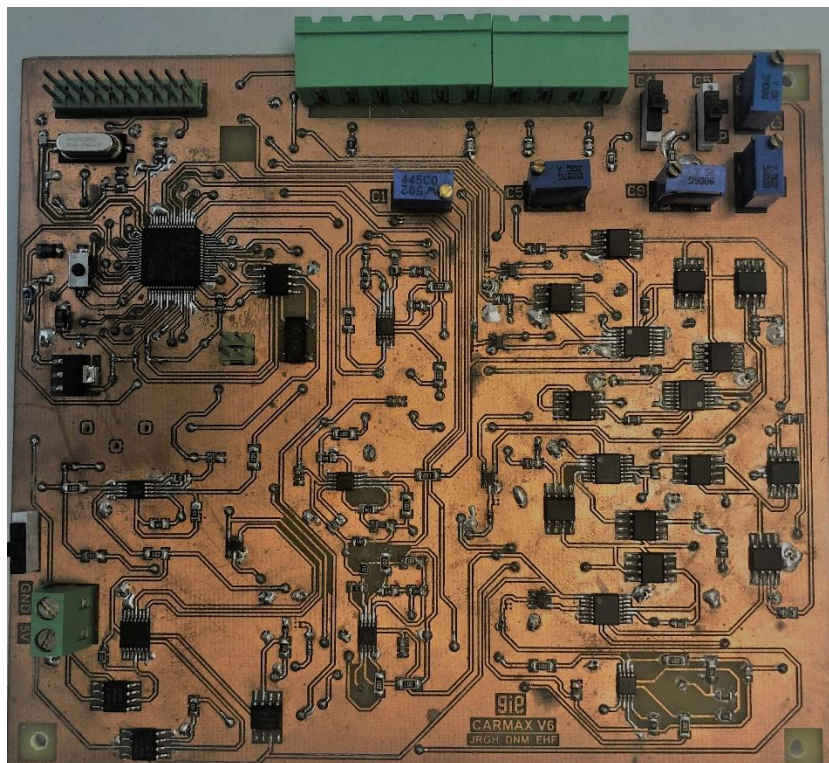


Figura 4 - 21. PCB del reflectómetro fabricada

4.2.3. Validación Experimental

Previamente a la validación experimental del sistema en un entorno real, se realizaron pruebas de laboratorio utilizando correas de diferentes longitudes, empleando, a su vez, diferentes valores para la resistencia de carga R_L con el fin de emular distintos tipos de fallos en la terminación de la línea.

En el marco anteriormente descrito, el sistema resultó sensible a las variaciones mínimas de 10Ω proporcionadas por la propia resolución de los potenciómetros digitales.

Además, para la localización del fallo a partir de la expresión $l = t \cdot v/2$ fue necesario conocer previamente el valor exacto de la velocidad en el medio v . Para ello, se realizaron medidas para localizaciones de fallo l conocidas con un osciloscopio de altas precisión, con el que se midió el tiempo t . De este modo, se determinó el valor de $v = 1.45 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (es decir, $\epsilon_r = 4.28$), el cual fue utilizado posteriormente para la localización de los fallos detectados. Adicionalmente, teniendo en cuenta este valor de $v = 1.45 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, y sabiendo que, las dimensiones de la línea son $D = 2 \text{ mm}$ y $d = 1 \text{ mm}$, la impedancia característica de ésta resultó, a partir de la ecuación (4 - 25), $Z_0 = 76.39 \Omega$.

Tras las pruebas de laboratorio, se realizaron pruebas de campo instalando el sistema en un ascensor real, con una correa de 160 m de longitud, y ubicado en la fábrica de la empresa MP Ascensores [4 - 55].

Tras la calibración de R_{in} y R_L , se indujo un daño en la correa cortando progresivamente el dieléctrico externo así como el primer núcleo metálico. Este fallo comenzó a ser detectado con una variación de señal de 32 mV a la salida del amplificador de instrumentación (configurado con ganancia igual a 5. Dicha variación en la tensión vino producida, teóricamente, por un cambio de impedancia de 0.6Ω , empleando una tensión de 3.3V como fondo de escala. Sin embargo, aunque se detectó este cambio, éste no se produjo hasta haber cortado aproximadamente el 90% del primer núcleo, por lo que se puede concluir que los daños leves (*soft faults* en la literatura) no se podrán medir empleando el sistema propuesto. Sin embargo, aun teniendo en cuenta esta limitación, el sistema está capacitado para la detección del mal estado de uno de los núcleos, lo cual, teniendo en cuenta que la correa cuenta con 10 núcleos, significa que se puede detectar el mal estado de la correa mucho antes de la rotura final de ésta. Por tanto, se puede concluir que el sistema está capacitado para la detección de fallos de forma preventiva y en tiempo real.

Por otro lado, cabe comentar que, con objeto de reducir el coste del sistema, se ha utilizado el ADC integrado en el microprocesador seleccionado, el cual cuenta con una frecuencia de muestreo máxima de 1 MSps , la cual limita enormemente la precisión en la localización de los fallos. A modo de ejemplo, en la Figura 4 - 22 se muestra la captura de la señal reflejada en el caso de generar un tren de pulsos con un ancho de 20 ns y un período de $10 \mu\text{s}$ e inducir un fallo, producido por un circuito abierto, a una longitud $l = 4 \text{ m}$. Como se puede observar en la Figura 4 - 22, dicho fallo a 4 m derivó en la reflexión de un nuevo pulso, el cual resultó a 55 ns del original, a partir de la medida de este tiempo con un osciloscopio de altas prestaciones.

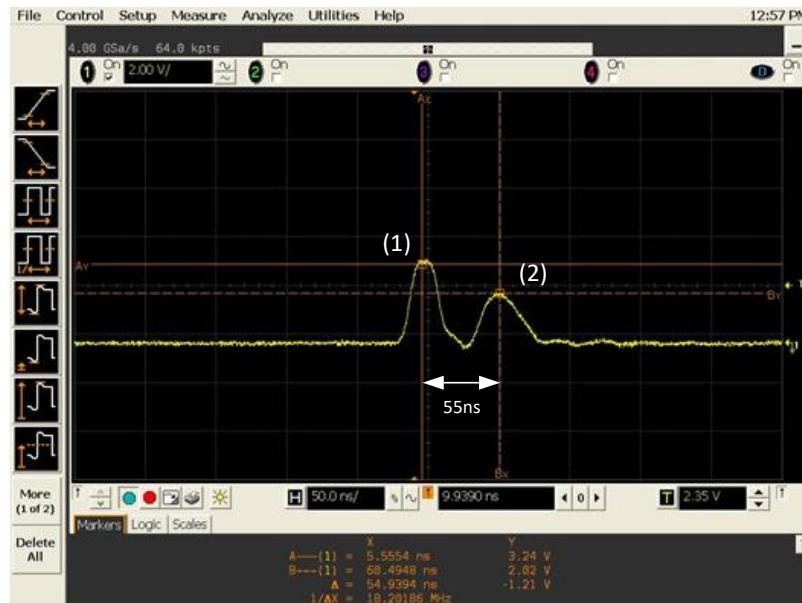


Figura 4 - 22. Pulso generado (1) y reflejado (2) debido a un fallo a 4m

Por tanto, para el cálculo de la ubicación del fallo con este equipo de alta precisión basta con aplicar la fórmula $l = t \cdot v/2$, a partir de los valores conocidos de t y v , localizándose el fallo en $l = 3.9875$ m, es decir con un mínimo error. Sin embargo, empleando el ADC disponible, el cual cuenta con un tiempo de muestreo mínimo de $1\mu s$, resultaría una resolución espacial bastante pobre, teóricamente en torno a 72,5 m. Por lo tanto, será necesario mejorar el sistema en cuanto a localización espacial se refiere. Para conseguirlo utilizando la misma electrónica de bajo coste, se propone aplicar técnicas basadas *compressive sensing*, cuyo desarrollo se detalla en el punto 4.2.4.

4.2.4. *Compressive sensing* para localización de fallos

Como se ha comentado anteriormente, el ADC integrado en el microprocesador no cuenta con capacidad de muestreo suficiente para conseguir una buena resolución espacial, por lo que es necesario aplicar otras técnicas orientadas a mejorar dicha resolución. Éste es el caso de las técnicas basadas en CS, las cuales implementan el muestreo a partir del uso de una matriz de coeficientes aleatorios almacenada en la memoria del microprocesador, de modo que se tomarán un número de muestras muy inferior a las necesarias en comparación con el caso de muestrear a la tasa de Nyquist. La implementación de dicha técnica para esta aplicación tendrá un doble objetivo:

- Evitar el uso de convertidores analógico-digital de alta velocidad para la localización espacial exacta del fallo producido, los cuales aumentarían el coste de los múltiples nodos individuales, instalados en cada ascensor.
- Minimizar el número de datos transferidos al nodo procesador central, preferentemente mediante la implementación de una red inalámbrica.

Dicho procesador central implementará la recuperación de la señal original, el cual es el proceso de mayor carga computacional del sistema propuesto, calculando de este modo la localización espacial exacta del fallo producido. Esta técnica ha sido utilizada exitosamente en aplicaciones como [4 - 56] y [4 - 57].

De este modo, en base al sistema TDR detallado anteriormente y a su extensión basada en CS, el flujo del algoritmo de detección y localización del fallo sería el siguiente:

- Generación del pulso inicial y calibración de impedancias.

- Monitorización periódica del estado de la correa.
- Detección del fallo producido y generación del pulso para la localización del fallo.
- Implementación del muestreo aleatorio de la señal reflejada a partir de la matriz de coeficientes aleatorios almacenada.
- Transferencia de las muestras de la señal comprimida al procesador central.
- Recuperación de la señal original y detección de la localización exacta del fallo producido.

Como se ha comentado previamente, CS es una técnica conocida y ampliamente utilizada para la reconstrucción de vectores con un alto nivel de *sparsity*, es decir, vectores donde sólo un pequeño número de sus componentes es distinto de 0. De este modo, dado un vector *sparse* x N -dimensional, es posible comprimirlo en otro vector y M -dimensional a partir de la ecuación $y = \Phi \cdot x$ (siendo $K < M \ll N$), donde K es el número de componentes del vector x distintos de cero y Φ es la matriz de observación de tamaño $M \times N$, la cual está formada por números aleatorios normalmente distribuidos que implementarán una proyección ortonormal del vector x [4 - 58].

Para este diseño, en el procesador central, se aplica un algoritmo de recuperación de tipo *l1-minimization*, debido a que es uno de los modelos de decodificación más empleados y para los que existen disponibles un mayor número de *scripts* en Matlab para la resolución de la ecuación lineal indeterminada $y = \Phi \cdot x$, es decir, para reconstruir la señal x .

Para esta aplicación se puede considerar la señal recibida como *sparse* en el dominio temporal, debido a que la que tan solo contendrá las muestras correspondientes al pulso original y al pulso reflejado como muestras con amplitud de valores distintos de cero para el periodo empleado de 10 μ s. Por tanto, interesará reducir el ancho de los pulsos tanto como sea posible, para así aumentar el nivel de *sparsity* de la señal. De este modo, se fijó en 20 ns dicho ancho de pulso, valor que es cercano al mínimo que permiten los GPIOs del microcontrolador.

Para ilustrar la idea de CS implementada, la Figura 4 - 23 (1) representa una captura experimental de la señal reflejada al provocar un fallo en la correa a 4 m de distancia del generador de pulso. Sobre esta señal se tomarán una serie de M muestras (marcadas en rojo) y, a partir de ellas, se implementará el proceso de recuperación de la señal, a partir de un algoritmo codificado en Matlab, el cual devolverá la señal original recuperada, es decir, la localización de los valores distintos de 0 (Figura 4 - 23 (2)).

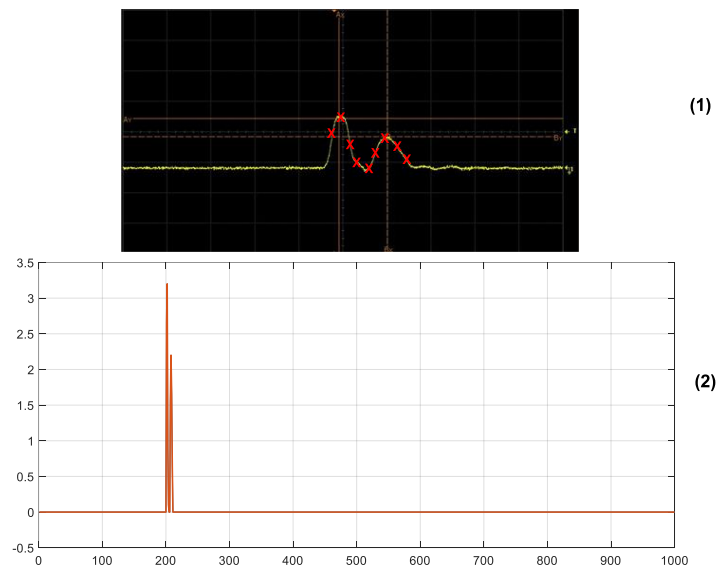


Figura 4 - 23. Captura de la señal con el osciloscopio (1) y señal recuperada (2)

Así mismo, se realizó un estudio preliminar para determinar el número M de muestras necesarias, que serán enviadas al PC externo, para alcanzar un requisito de resolución espacial Δ determinado, el cual está directamente relacionado con el número de muestras N tomadas de la señal original. De este modo, la Figura 4 - 24 muestra la probabilidad de la detección para los distintos valores de M y Δ .

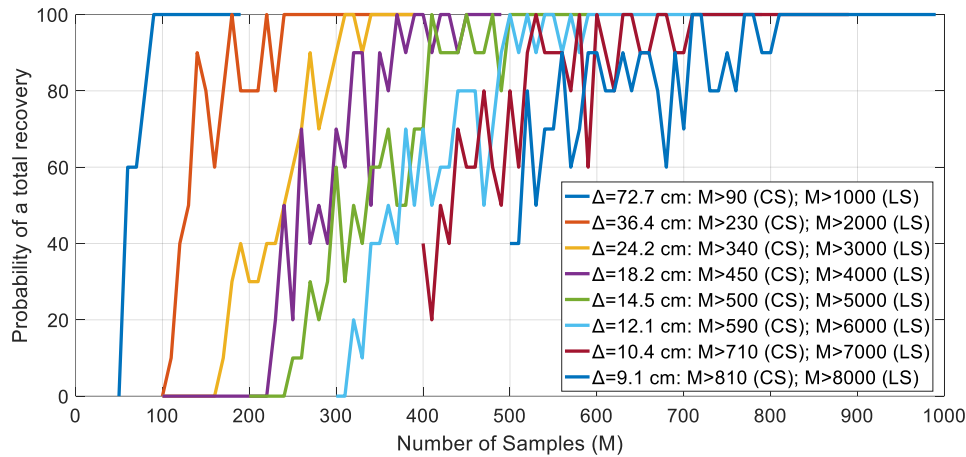


Figura 4 - 24. Número de muestras M necesarias para diferentes requisitos de resolución espacial Δ

Se puede observar cómo los beneficios que ofrece esta técnica son más significativos a medida que la resolución requerida es mayor, comparando con respecto al número de muestras necesarias en el caso de utilizar procesamiento lineal (*Linear Sampling*, LS) en lugar del CS.

Una vez que la señal es recuperada, la ubicación del fallo es fácilmente localizable calculando la distancia entre los dos pulsos recibidos en función del tiempo de muestreo.

Por ejemplo, para el caso anterior de un fallo inducido a una distancia de 4 m, el fallo es localizado a 4.35 m (error del 8.75%) usando $N = 1000$ (lo que corresponde a una tasa equivalente de muestreo de $f_s = 100\text{MHz}$ para una señal de $10\text{ }\mu\text{s}$ de período), mientras que el fallo es localizado a 4.078 m (1.95% de error) en caso de utilizar $N = 8000$, lo cual equivale a una $f_s = 800\text{MHz}$. Como es esperado, la precisión aumenta a medida que N aumenta, consiguiéndose un error en torno al 1%, lo que, según [4 - 54], está en el rango de precisión de los sistemas TDR basados en equipos de instrumentación de alto coste.

Finalmente, tras haberse presentado los resultados obtenidos y la validación del sistema, así como de la metodología aplicada, se presenta una comparativa, en lo que a la resolución espacial se refiere, con otros sistemas de inspección de cables anteriormente publicados (Tabla 4 - 9). Es posible observar cómo los resultados obtenidos para el sistema propuesto son satisfactorios, encontrándose su precisión en el mismo orden de la de los sistemas publicados con mayor resolución, y evitando, al mismo tiempo, el uso de frecuencias en el rango de los GHz de otros sistemas TDR ([4 - 53], [4 - 60]), así como el uso de los equipamientos de alto coste empleados en otras tecnologías ([4 - 63], [4 - 64], [4 - 54]).

Referencia	Tecnología	Resolución Espacial (cm)
[4 - 59]	TDR	40
[4 - 53]	TDR	10

[4 - 60]	TDR	14,4
[4 - 61]	TDR	30
[4 - 62]	TFDR	9-26
[4 - 63]	NDR	6,4-8,8
[4 - 64]	SSTD	6
[4 - 54]	IS	40
Este Desarrollo	CS-TDR	9,1

Tabla 4 - 9. Comparativa entre distintos sistemas de localización de fallos

4.2.5. Conclusiones

En esta sección 4.2 se ha propuesto un sistema fiable, preciso, auto-calibrado y de bajo coste para la detección y localización de fallos en las correas utilizadas en los ascensores utilizando para ello un sistema TDR de alto rendimiento.

Para ello, el sistema se basa en la detección de cambios en la impedancia de la línea cuando aparecen daños, lo que provoca un pulso adicional en la onda reflejada, a partir del cual se puede detectar la ubicación del fallo midiendo el retraso entre la señal original y la reflejada. Además, y como principal novedad, se utilizan técnicas basadas en CS con el objetivo de incrementar la precisión del sistema, minimizando, además, la cantidad de información a transmitir al sistema central, encargado de realizar la recuperación de la señal original, es decir, las operaciones de mayor coste computacional, lo cual entra dentro de las recomendaciones a seguir para el diseño y desarrollo de un sistema que se ubique dentro del paradigma IoT.

En lo que a precisión se refiere, el sistema diseñado mejora la resolución espacial desde el orden de metros hasta centímetros, posibilitando, de este modo, la detección y localización de fallos de forma preventiva y en tiempo real, lo que, de nuevo, demuestra la factibilidad de su inclusión dentro de los sistemas IoT.

4.3. Monitorización de salud estructural

En esta sección, se desarrolla un sistema de monitorización de salud estructural en el marco del paradigma IoT, el cual ofrece una serie de capacidades a estos sistemas frente a los tradicionalmente desarrollados. Estas capacidades pasan por dotar a los nodos de acceso a internet y comunicación de la información adquirida de la infraestructura en tiempo real. Por otro lado, la transmisión en tiempo real posibilita el procesamiento remoto de la información y por tanto disponer de la capacidad de cálculo necesaria para ejecutar los algoritmos deseados. Además el hecho de tratar la información de forma remota permite obtener una visión de los sistemas SHM más global, integrándolo dentro del concepto de *Smart Cities* o *Smart Industry*.

Por los motivos anteriormente expuestos, en esta sección se afronta el diseño de un sistema SHM inalámbrico, distribuido y de muy bajo consumo con capacidad de detectar daños estructurales, para lo que será evaluado sobre dos estructuras de distinta naturaleza.

Por otro lado, cabe comentar que si bien el desarrollo realizado se enmarca en el paradigma IoT, este fue llevado a cabo en el momento de irrupción de IoT como escenario de implantación real y que por tanto las tecnologías disponibles no contaban con las ventajas que en este momento ofrecen, tras varios años de evolución, tales como NB-IoT, Sigfox o LoRa.

4.3.1. Introducción y estudio del estado del arte

Las infraestructuras civiles son diseñadas para que su ciclo de vida sea de varias décadas, durante el cual se debe garantizar su integridad estructural. Para ello nacen los sistemas SHM (*Structural Health Monitoring*) o de Monitorización de Salud Estructural.

Generalmente, se trata de una serie de procesos concatenados que implican análisis numérico, resultados experimentales, identificación de sistemas, actualización de modelos e identificación de daños.

Históricamente, debido a la complejidad de las infraestructuras, tan solo se disponían unos pocos sensores cableados a lo largo de las mismas. Sin embargo, para tener un control y conocimiento de las grandes infraestructuras civiles es necesario tener una densidad de nodos elevada. Las nuevas tecnologías inalámbricas proporcionan la capacidad para desplegar cientos de nodos en espacios reducidos pudiendo identificar de esta forma no solo comportamientos globales de las estructuras bajo análisis, sino también comportamientos locales y por tanto poder detectar daños estructurales con más precisión. Por estos motivos, las tecnologías inalámbricas están llamadas a ser la mejor opción para la monitorización de infraestructuras civiles [4 - 65], [4 - 66].

Las primeras experiencias de aplicar redes inalámbricas a sistemas SHM fueron llevadas a cabo sobre puentes de carretera [4 - 67] y dichos sistemas, los cuales utilizaban redes inalámbricas de hasta dos niveles, eran conocidos como WGBEMS (*Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System*). Como ejemplo de aplicación, una de los principales experimentos llevados a cabo fue realizado en el puente del Cañón de Alamosa [4 - 68] donde se realizó la primera comparativa entre el rendimiento de un sistema SHM tradicional o cableado y uno inalámbrico resultando ambos sistemas similares y ofreciendo el sistema inalámbrico una ventaja muy importante: el tiempo de instalación. Éste fue desplegado en tan solo 30 minutos. De la misma manera, este puente fue el escenario de validación de otros prototipos actualizados [4 - 69].

Una característica común de los sistemas SHM es la utilización de la vibración de las estructuras como parámetro fundamental para la extracción de las características estructurales de la infraestructura bajo análisis [4 - 70], [4 - 71]. Comúnmente, las vibraciones obtenidas por los acelerómetros son usadas en técnicas OMA (*Operational Modal Analysis*), las cuales son un conjunto de procedimientos para la identificación de los parámetros de comportamiento estructural fundamentales, tales como las

frecuencias naturales, el amortiguamiento o las formas de modo, las cuales son la respuesta en vibración a excitaciones externas [4 - 72], [4 - 73], [4 - 74].

La utilización de estos métodos OMA requiere, generalmente, de la toma de decisiones basadas en resultados experimentales previos, las cuales pueden ser tomadas por humanos por algoritmos de análisis y detección de daños estructurales, los cuales monitorizan constantemente la estructura. La clasificación general de algoritmos SHM y el detalle del seleccionado para este desarrollo se detallan en el siguiente punto.

4.3.2. Algoritmos SHM

La identificación de daños estructurales basadas en la medida de la vibración de la estructura bajo análisis es sometida a 5 cuestiones cuyas respuestas fijan el nivel del sistema:

- ¿Existe Daño?
- ¿Dónde está el daño?
- ¿Qué tipo de daño existe?
- ¿Cómo de severo es el daño?
- ¿Cuánto tiempo de vida le queda a la estructura?

Para responder a estas preguntas es necesario monitorizar la respuesta en vibración de la estructura y ejecutar el proceso de identificación [4 - 75]. Partiendo de la base de que cada sistema tiene unas características dinámicas particulares (frecuencias naturales, modos y coeficientes de amortiguamiento), la metodología debe ser adaptable a cada estructura y no puede partir de una caracterización generalista.

De esta forma los algoritmos utilizados para tareas SHM pueden ser de dos tipos:

- Paramétricos: Basado en modelos autorregresivos y procesos estocásticos, puramente matemáticos.
- No paramétricos: Basados en la representación de las características físicas de la estructura (rigidez, masas, etc)

El proceso de diseño de una estructura civil parte del modelo de elementos finitos de la misma el cual, tras la fabricación de la misma, es actualizado y validado mediante la utilización de acelerómetros que miden las vibraciones de la misma [4 - 76].

En este desarrollo se ha empleado un método basado en el reconocimiento de patrones estadísticos de comportamiento de las estructuras. Una de las ventajas de estos métodos es la no necesidad de sincronización entre los distintos nodos sensores, lo que posibilita un despliegue de red inalámbrica más sencillo y una reducción significativa del consumo de potencia, y por tanto maximizar el tiempo de vida de los nodos. Otro de los factores que tienen un alto impacto en la maximización del tiempo de vida de los nodos es el procesamiento local de datos en lugar de transmitir inalámbricamente cada uno de ellos [4 - 66] y en la Tabla 4 - 10 ([4 - 77]).

Proceso	Longitud (muestras)	Energía consumida (MPC555)(J)	Energía consumida radio	Energía ahorrada
FFT	1024	0.0152	1,6212	99.062
FFT	2048	0.0328	3,2426	98.988
FFT	4096	0.0702	6,4854	98.917

AR 10	2000	0.5031	3,1666	84.112
AR 20	2000	1,0224	3,1666	67.713
AR 30	2000	1,5398	3,1666	51.374
AR 10	4000	10.072	63.333	84.097
AR 20	4000	20.484	63.333	67.657
AR 30	4000	30.879	63.333	51.243

Tabla 4 - 10. Consumo y ahorro de potencia

El algoritmo seleccionado en este caso se basa en el uso de coeficientes autorregresivos de dos niveles, combinando un modelo autorregresivo (AR) y otro autorregresivo con entradas exógenas (ARX). La principal idea de este método es la creación de una gran base de datos con los distintos comportamientos que presenta la estructura en estado saludable durante un largo periodo de tiempo y posteriormente comparar estos datos con los extraídos por los acelerómetros durante el tiempo de operación de la estructura [4 - 78].

Por tanto, este método cuenta con dos fases claramente diferenciadas: la fase de generación del modelo y la fase de monitorización.

Durante la fase de generación del modelo, se toman series de datos, $x(t)$, con la estructura en estado saludable. Estas series son normalizadas en media y desviación estándar antes de ser enviadas al nodo central, donde se almacena la base de datos:

$$\hat{x} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (4 - 26)$$

donde \hat{x} es la señal estandarizada, μ_x es la media y σ_x la desviación típica de la misma.

Partiendo de estas series temporales se generan una serie de modelos $AR(p)$. De esta forma, El modelo autorregresivo de p coeficientes $AR(p)$ predice la siguiente muestra de una serie temporal usando la siguiente ecuación:

$$x(t) = \sum_{j=1}^p \phi_{xj} x(t-j) + e_x(t) \quad (4 - 27)$$

donde ϕ_{xj} son los coeficientes autorregresivos y e_x es el error residual. Se puede inferir que la predicción será más precisa a medida que la base de datos de modelos sea mayor. Además, todos esos modelos $AR(p)$ se almacenarán con su modelo $ARX(a, b)$, el cual es calculado según la siguiente ecuación:

$$x(t) = \sum_{i=1}^a \alpha_i x(t-i) + \sum_{j=1}^b \beta_j e_x(t-j) + \varepsilon_x(t) \quad (4 - 28)$$

donde α_i y β_j son los coeficientes ARX y ε_x es el error residual que, en este caso, representa la característica sensible al daño y que por tanto será usada para la detección de la existencia de ellos.

Una vez que se cuenta con una base de datos de modelos de comportamiento suficientemente grande se pasa a la fase de monitorización en la que los acelerómetros toman nuevas series temporales, $y(t)$, en un estado de salud *desconocido* y se calculan los coeficientes $AR(p)$ con el siguiente modelo:

$$y(t) = \sum_{j=1}^p \phi_{yj} y(t-j) + e_y(t) \quad (4-29)$$

donde ϕ_{yj} son los coeficientes autorregresivos en el estado de salud desconocido y e_y es el error residual entre el valor real y el estimado por (4-29). En este punto, el nodo, tras calcular los coeficientes autorregresivos, envía dichos datos inalámbricamente al servidor central, que selecciona, de la base de datos de modelos de comportamiento, el modelo de comportamiento más similar al que representan los coeficientes autorregresivos recibidos.

Como se puede apreciar en el párrafo anterior, la información que se transmite hasta el nodo central son solo los coeficientes autorregresivos en lugar de toda la serie temporal, con el consiguiente ahorro energético. La selección del modelo más próximo al recibido se realiza según la siguiente premisa:

$$ecumin \left[\sum_{j=1}^p (\phi_{xj} - \phi_{yj})^2 \right] \quad (4-30)$$

donde ϕ_{xj} son los coeficientes del caso saludable y ϕ_{yj} los del caso desconocido.

Posteriormente, el servidor central envía de vuelta al nodo inalámbrico los coeficientes ARX, α_i y β_j , asociados al modelo AR seleccionado como más cercano al recibido en el nodo central. El nodo inalámbrico calculará el error residual de $y(t)$, aplicando dichos coeficientes, como se detalla a continuación.

$$ecu\varepsilon_y = y(t) - \sum_{i=1}^a \alpha_i \cdot y(t-i) - \sum_{j=0}^b \beta_j \cdot e_y(t-j) \quad (4-31)$$

Finalmente, se calcula el índice de daño como sigue:

$$\frac{\sigma(\varepsilon_y)}{\sigma(\varepsilon_x)} \quad (4-32)$$

donde $\sigma(\varepsilon_x)$ y $\sigma(\varepsilon_y)$ son las desviaciones típicas de los errores residuales de $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente.

Por tanto, el índice de daños estará en torno a 1 en caso de que la estructura se encuentre en estado saludable y será mayor que 1 en caso de existir daños en la misma.

4.3.3. Diseño de nodos inalámbricos y aspectos de implementación

Una de las ventajas principales que ofrece el uso de tecnologías inalámbricas que evita las instalaciones cableadas, lo que en ocasiones tiene un impacto muy elevado en el coste del sistema incluso llegando a ser el coste principal del sistema. En un caso como el que nos ocupa en esta sección en la que se pretenden instalar cientos de nodos en una estructura el coste de la instalación cableada puede ser muy elevado, por lo que evitar dicha instalación y su mantenimiento es un factor muy importante.

Por ello, dentro de las tecnologías que se adaptan a este tipo de aplicaciones (muy bajo consumo, largo alcance, bajo coste y baja tasa de datos), se selecciona la tecnología IEEE 802.15.4-2006 como

implementación de una red tipo LR-WPAN y como estándar para la comunicación inalámbrica. Sobre IEEE 802.15.4-2006, que ofrece las capacidades de nivel físico y enlace, se monta Zigbee como capa de red. A continuación se especifican las características principales de la red seleccionada.

Parámetro	Valor
Frecuencia y Tasa de Datos	868 MHz: 20Kb/s
	915 MHz: 40 Kb/s
	2.4 GHz: 250 Kb/s
Alcance	10-1000 m
Latencia	<15 ms
Canales	868/915 MHz: 11 Canales
	2.4 GHz: 16 Canales
Direccionamiento	64 bit
Modo de Acceso	CSMA-CA
Seguridad	128 AES
# Dispositivos	Hasta 2 ⁶⁴
Rango de Temperatura	-40 a 85 °C

Tabla 4 - 11. Características de Zigbee-IEEE 802.15.4-2006

Como se ha comentado al inicio de esta sección, este trabajo fue realizado antes de la última revisión del estándar IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15.4-g) en el que se incluían nuevas capacidades, como la transmisión en la banda de los 169 MHz o un alcance de hasta 20 Km en línea vista, entre otras.

A nivel de nodo el diseño realizado responde al siguiente diagrama de bloques:

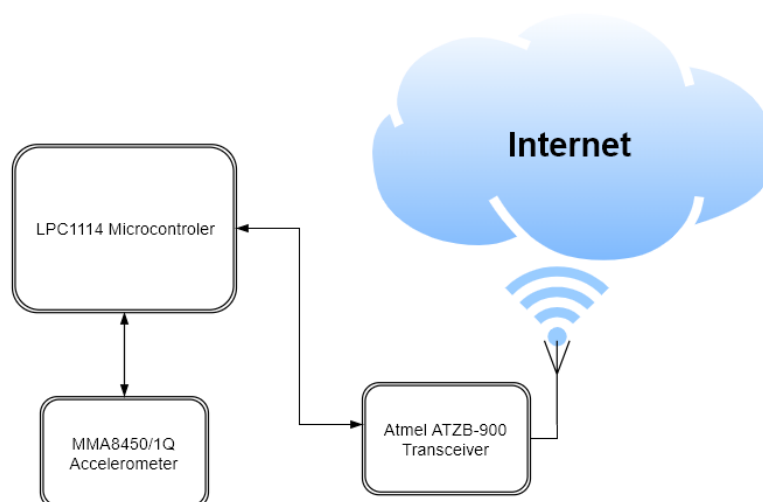


Figura 4 - 25. Diagrama de bloques del Nodo SHM

Como se puede apreciar en la Figura 4 - 25, una de las principales características que tiene el nodo y que corresponde a uno de los bloques funcionales es el acelerómetro encargado de medir las vibraciones de la estructura en la que se instale. De acuerdo con [4 - 79], se estima que el dispositivo seleccionado debe contar con un *full scale* del rango 2g-4g (donde g es la aceleración de la gravedad), lo que sería un rango [-2g, 2g]. Además [4 - 80] justifica que, para este tipo de aplicaciones, una sensibilidad de 1mg es suficiente.

Para la selección del acelerómetro se han realizado pruebas del modelo MMA8450Q de Freescale, un acelerómetro de 12 bit y el MMA8451Q, también de Freescale, pero en este caso con una resolución de 14 bit. Las principales características de ambos se detallan en la Tabla 4 - 12.

Uno de los aspectos a destacar del sistema diseñado frente a los existentes en la bibliografía es la utilización de un microcontrolador de 32 bit de alto rendimiento y bajo consumo, como consecuencia del procesamiento de señal local que implica el algoritmo seleccionado. En este caso ha sido seleccionado el Cortex-M0 LPC1114 de NXP Semiconductors. Las características principales de estos dispositivos también se detallan en la Tabla 4 - 12.

Finalmente, a nivel de dispositivos de red, la frecuencia de trabajo seleccionada ha sido la banda de los 868 MHz debido, principalmente, a las mejores prestaciones que presenta en lo que a alcance se refiere. El módulo que se utiliza es el ATZB-900-B0 de Microchip Technology, el cual es un transceptor compacto, de bajo consumo y compatible con 802.15.4 y Zigbee. Sus características principales se muestran en la Tabla 4 - 12. No obstante es necesario comentar que el diseño de la solución de red inalámbrica utilizada en estos nodos no es parte del alcance de la Tesis, sino que fue provisto por la empresa Adevice Solutions S.L. tras el estudio de las distintas alternativas posibles. No obstante, los datos característicos de la red inalámbrica se incluyen en esta sección en tanto que condicionan el alcance global del sistema desarrollado y su consumo energético condiciona el tiempo de vida global del sistema como un elemento autocontenido.

Parámetro	MMA8450Q	MMA8451Q
Tensión de alimentación	1,8 V	1,9 - 3,6 V
Consumo en Modo Bajo Consumo	72 uA	44,72 uA
Consumo en Modo Normal	132 uA	85 uA
<i>Full Scale</i>	+2 +4 +8	+2 +4 +8
Sensibilidad	0,0976, 1,953, 3,906 mg/dig	0,244, 0,488, 0,976 mg/dig
Conectividad	I ² C	I ² C
LPC1114		
# Bits	32	
Tensión de alimentación	3,3 V	
Consumo (50MHz)	9 mA	
Consumo en Modo de Bajo Consumo	220 nA	

Conectividad	UART
	SPI
	IIC
ATZB-900-B0	
Tensión de alimentación	1,8 V
Consumo en recepción	15 mA
Consumo en transmisión (5 dBm)	20 mA
Consumo en Bajo Consumo	6 uA
Banda de frecuencia	779 - 787 MHz
	868 - 868.6 MHz
	902 - 928 MHz
# Canales	15
Sensibilidad en recepción (20 Kb/s)	-110 dBm

Tabla 4 - 12. Características del nodo inalámbrico

En la Figura 4 - 26 ([4 - 77]) se muestra una imagen del resultado del nodo final, el cual es alimentado por 2 baterías tipo AA.

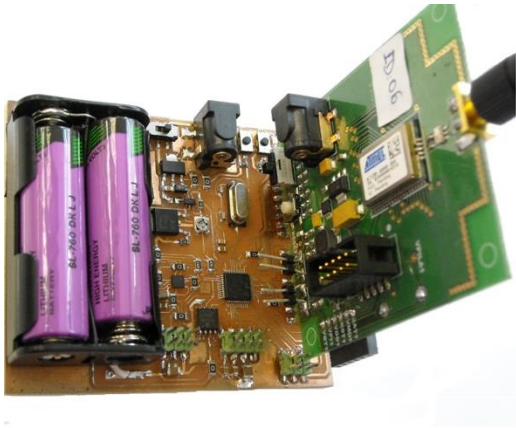


Figura 4 - 26. Nodo inalámbrico remoto

Continuando con los elementos de red, los routers intermedios cuentan con un diseño similar a las unidades inalámbricas de los nodos remotos, a los que se les elimina todo el bloque de adquisición y procesamiento de señal.

Estos dispositivos tienen como función principal extender el área de cobertura del sistema posibilitando su uso en grandes extensiones de terreno o en interiores. No obstante, debido a que estos dispositivos están constantemente encendidos, son alimentados desde la red eléctrica, lo cual es una limitación de la tecnología que, en el momento de la realización de estos desarrollos no era salvable, tal y como lo es hoy día.

El elemento final de la red inalámbrica es el coordinador de red o pasarela, encargado de interconectar la red IEEE 802.15.4 (2006) con Internet. Al igual que los routers, este dispositivo, único por red inalámbrica, es alimentado por la red eléctrica.

4.3.4. Resultados experimentales

Las pruebas llevadas a cabo con estos dispositivos son realizadas en dos tipos de estructuras distintas, las cuales simulan un puente y un edificio de 4 plantas, las cuales se muestran en la Figura 4 - 27 y la Figura 4 - 28 ([4 - 77]).



Figura 4 - 27. Placa de acero rectangular (puente)

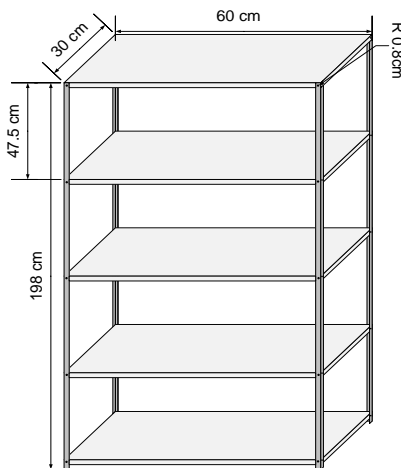


Figura 4 - 28. Estructura de 5 plantas rectangulares

Antes de realizar las medidas experimentales sobre las estructuras se realiza un estudio del modelo de elementos finitos de la configuración representada en la Figura 4 - 27, lo cual es el flujo de desarrollo de cualquier sistema de monitorización de salud estructural.

4.3.4.1. Placa rectangular de acero

Los modelos de elementos finitos son usados para el estudio del comportamiento estructural de las distintas construcciones civiles, tales como puentes, edificios, presas, etc., [4 - 81]. La estructura bajo análisis es dividida en partes pequeñas que tienen un comportamiento estructural similar. A su vez, estas partes son subdivididas en otros elementos más pequeños llamados *Elementos Finitos*. Esta

discretización de las estructuras posibilita simular el comportamiento de la estructura completa, que puede contar con infinitos grados de libertad, basada en el comportamiento de algunos de esos elementos.

Propiedades geométricas y materiales de la estructura rectangular

Para el trabajo teórico realizado se considera que la estructura bajo análisis es una placa de acero, de dimensiones 1800 mm x 1000 mm x 10 mm homogénea e isotrópica.

En base a esto, la densidad de la placa será tomada como 7850 kg/m³, el módulo de Young 2.1·10¹¹ y el coeficiente de Poisson 0.3.

Modelado de Elementos Finitos

Para el modelado de la estructura como el conjunto formado por una serie de elementos finitos, se divide la misma en una red formada por 18 x 10 elementos. Se trata de elementos finitos isoparamétricos de cuatro nodos y cinco grados de libertad en cada nodo: 3 de desplazamiento y 2 rotacionales [4 - 77].

Ecuaciones de sistema, condiciones de contorno y fuerzas externas

Para obtener el comportamiento del sistema se parte del balance de fuerzas entre la fuerza inercial, el amortiguamiento, la elástica y las externas, tal y como se refleja en la siguiente ecuación.

$$[M] \ddot{x}(t) + [C] \dot{x}(t) + [K] x(t) = f(t) \quad (4 - 33)$$

donde [M], [C] y [K] con las matrices del modelo de elementos finitos relativas a la masa, el amortiguamiento y la rigidez. La respuesta temporal de la estructura bajo fuerzas externas $f(t)$ es representada por $x(t)$ [4 - 77], la cual es representada en la Figura 4 - 29.

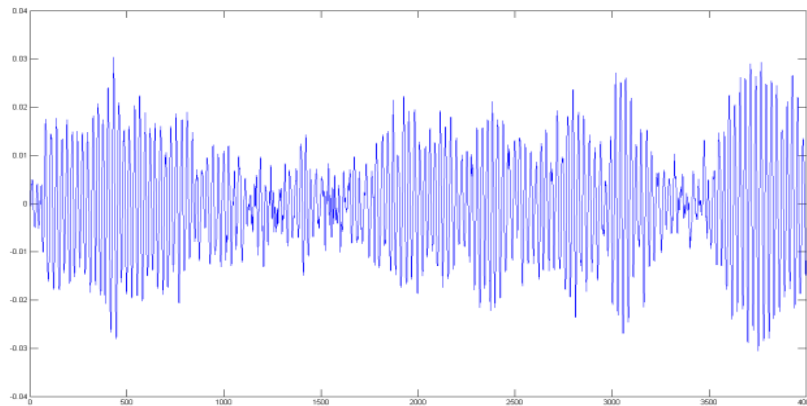


Figura 4 - 29. Señal sintética

Pruebas reales sobre la placa rectangular de acero

Como se ha detallado anteriormente en esta sección, la primera fase, la fase de generación de la base de datos de modelos de comportamiento de la estructura es el primer paso.

Así, para generar dicho modelo de datos en distintas condiciones de trabajo de la estructura, se grabó el comportamiento de la misma con distintas cargas sobre esta, siendo excitada por pequeños golpes aleatorios o por el deslizamiento de una pequeña piedra por su superficie aleatoriamente. De esta forma se tomaron hasta 42 modelos de comportamiento de la estructura combinando cargas de entre 7.14 Kg y 19.04 Kg. En la Figura 4 - 30 ([4 - 77]) se puede apreciar las condiciones de carga de la estructura en la toma de uno de los modelos de comportamiento de referencia de la estructura en estado saludable. En este caso la carga es de 9.52 Kg.



Figura 4 - 30. Configuración para adquisición de modelo de comportamiento saludable (9.52 Kg)

El primer paso para validar el comportamiento de la estructura, como se comentó anteriormente, fue validar el modelo de elementos finitos que modela el comportamiento de la estructura. Para ello se hizo una toma de datos continua con un acelerómetro y el resultado de la misma se puede ver en la Figura 4 - 31 [4 - 77].

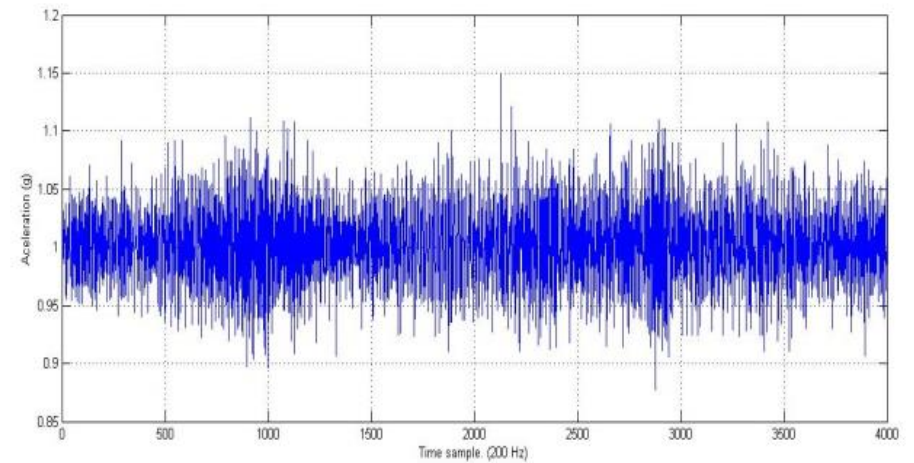


Figura 4 - 31. Registro de serie temporal. Estructura saludable

Seguidamente se realiza un análisis de las frecuencias naturales de la estructura, del que se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4 - 13 [4 - 77], es decir, el valor de las frecuencias naturales para el caso de la señal sintética, la señal real (tomada bajo 14.28 Kg de carga) y la desviación entre ambas.

Modelo	Frec. 1	Frec. 2.	Frec. 3	Frec. 4
Sintético (Hz)	7.35	19.33	30.13	46.92
Real (Hz)	6.495	17.75	25	41.74
Desviación (%)	13.16	8.901	20.52	12.41

Tabla 4 - 13. Frecuencias Naturales - Reales y Sintéticas

Si bien existe desviación entre la señal sintética y la real, ésta se debe a las condiciones ideales supuestas en el caso sintético, las cuales son imposibles de recrear en las pruebas reales.

No obstante, con objeto de validar la viabilidad del sistema desarrollado y el algoritmo aplicado se llevaron a cabo pruebas para detectar comportamientos que no estaban incluidos en la base de datos de modelos de referencia. Para lograrlo es necesario cargar la estructura con cargas mayores de la más alta que generase un modelo de referencia (19.04 Kg), como en la Figura 4 - 32 [4 - 77], o más pequeñas que la menor que generase un modelo de referencia (8.33 Kg).



Figura 4 - 32. Test real (22.61 Kg)

Los resultados de estos test se recogen en la Figura 4 - 33 [4 - 77].

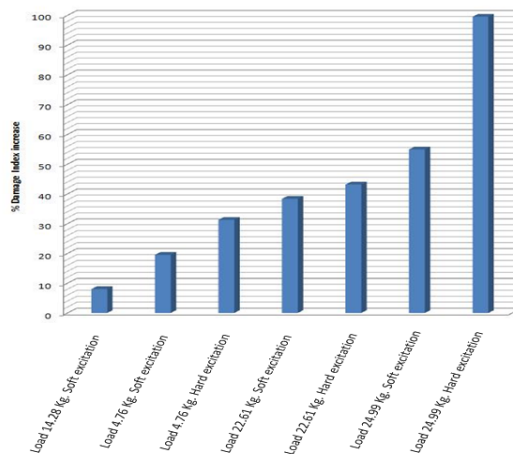


Figura 4 - 33. Indice de Daños de test reales

Se puede apreciar cómo en el caso en el que la carga de la estructura está dentro de los modelos tomados (14.28 Kg), el índice de daños está por debajo del 8%, siendo el menor de todos ellos. Por el contrario, cuando la carga a la que es sometida la estructura no está dentro de los modelos de comportamiento de referencia, como ocurre en el resto de test representados, el valor del índice de daños aumenta, yendo desde el 19% con una carga de 4.76 Kg al 99% en el caso de tener una carga de 24.99 Kg.

Por tanto, estos resultados validan la utilización de este sistema y este algoritmo para la detección de comportamientos anómalos frente a una base de modelos de datos de referencia.

4.3.4.2. Estructura rectangular de 5 pisos

Tras las pruebas realizadas en la placa metálica, se llevaron a cabo otras pruebas de campo sobre una estructura de aluminio de 5 pisos con planta rectangular. Estas pruebas se realizaron bajo las condiciones mostradas en la Figura 4 - 34 [4 - 82].



Figura 4 - 34. Configuración de nodos sensores en una estructura de 5 pisos de planta rectangular

La estructura representada en la Figura 4 - 34, cumple con los requisitos definidos en la norma sismo-resistente NCSE-02 [4 - 83], lo que la habilita para emular el comportamiento de un edificio.

Al igual que en el caso anterior, el primer paso es crear la base de datos de referencia contra la que comparar los modelos obtenidos en el periodo de monitorización. Para la creación de esta base de datos, se ubicaron distintas cargas en los distintos pisos y la excitación de la estructura se realizó con un flujo de viento constante.

A diferencia de los test realizados en la placa metálica, en este caso se utilizaron hasta 3 nodos sensores ubicados en distintas configuraciones con el objetivo de validar la capacidad del algoritmo para la localización de los daños.

Ya en la fase de monitorización se han realizado hasta 23 test diferentes en 4 configuraciones distintas, las cuales se caracterizan por (Figura 4 - 34):

- Configuración 1: un nodo en el piso 2, otro en el 4 y otro en el 5.
- Configuración 2: tres nodos en la planta 3 en posiciones seleccionadas aleatoriamente.
- Configuración 3: tres nodos en el piso 3 ubicados en una línea longitudinal.
- Configuración 4: tres nodos en el piso 3 ubicados en una línea transversal.

La batería de 23 test se realiza alternando test en los que la estructura está saludable y test en los que se le inducen daños. Los daños son inducidos eliminando o aflojando algunas de las fijaciones de los pisos a los pilares (tornillos) de los pisos 3 o 4. Es importante comentar que todos los test se realizaron en condiciones de carga de la estructura.

Como uno de los resultados principales se puede comentar que los 12 test realizados con la estructura en estado saludable, tuvieron como resultado un Índice de Daños (los 3 ejes de cada uno de los 3 nodos utilizados) próximo a 1 y por tanto ninguno detectó daños en la estructura.

Los resultados de los test realizados con la estructura dañada se muestran en la Figura 4 - 35, en la que se muestra el número de ejes analizados (rojo) y el % de ellos que son capaces de detectar daños estructurales (azul) en cada una de las pruebas realizadas en las 4 configuraciones anteriormente detalladas. Antes de analizar los resultados es necesario comentar que el umbral del Índice de Daños que implica valores estructurales ha sido fijado, en base a los resultados arrojados, en 1.275.

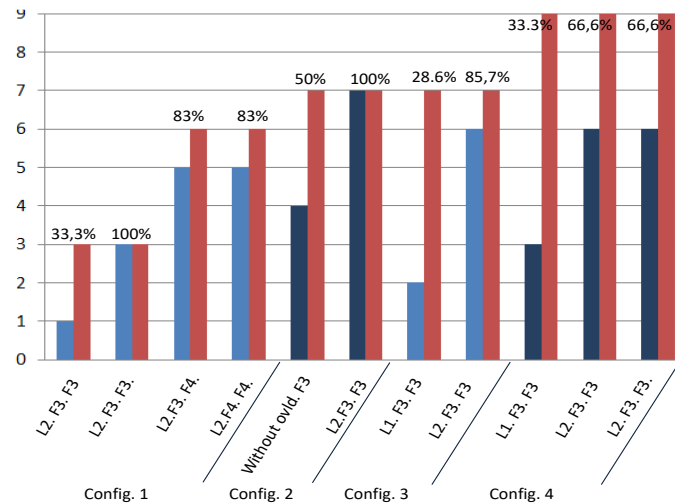


Figura 4 - 35. Resultados de test con daños estructurales

En la Figura 4 - 35 [4 - 82] se pueden observar hasta 4 parámetros distintos en la descripción de cada prueba. El primero de ellos es el tipo de carga sobre la estructura, donde *Load 2* (L2) es mayor que L1. El segundo parámetro es la ubicación de dicha carga (*Floor 2*, F2). El siguiente parámetro es el piso en el que se analizaron los daños (*Floor 3*, F3).

En los resultados ofrecidos por la Figura 4 - 35 se puede apreciar cómo en todo caso en el que se indujeron daños estructurales, el sistema ha sido capaz de detectarlo, aunque no de localizarlo, lo cual completa al resultado obtenido en las pruebas realizadas sobre la placa de acero rectangular y sitúa al sistema desarrollado en el Estado del Arte como un sistema de bajo consumo, bajo coste, inalámbrico y distribuido con capacidad para detectar comportamientos anómalos de las estructuras y daños estructurales.

4.3.5. Conclusiones

En esta sección se ha presentado el diseño y desarrollo de un sistema de monitorización de salud estructura el cual se basa en un algoritmo AR-ARX para la detección y localización de daños. La principal razón para utilizar este algoritmo es su descentralización y la no necesidad de sincronización entre los distintos nodos lo que posibilita el procesado local de información y la minimización de transmisión inalámbrica, maximizando la vida de la batería del nodo, con el impacto que eso tiene en el coste del sistema.

En lo que a pruebas experimentales se refiere, el sistema ha sido validado en 2 entornos distintos: una placa metálica rectangular que emula un puente y una estructura rectangular de 5 pisos que emula un edificio. En el primer caso se ha demostrado la capacidad del sistema para detectar casos de comportamientos anómalos o distintos a los medidos durante la fase inicial de generación de la base de datos de modelos de comportamiento de referencia. La generación de estas situaciones anómalas ha venido dada por la carga de la estructura con cargas muy grandes o muy pequeñas, las cuales no estaban incluidas en los modelos de referencia. En el segundo caso, el sistema ha demostrado ser capaz de detectar daños estructurales cuando estos han existido y de no ofrecer falsos positivos en el caso de que no existan daños. Por tanto, el sistema presentado en esta sección es un sistema de bajo consumo, autónomo, distribuido, bajo coste y alto rendimiento, apto para la detección daños y comportamientos estructurales anómalos.

4.4. Conclusiones del Capítulo

Partiendo de que el desarrollo de sistemas de monitorización de contenedores de mercancías inteligentes conforma el núcleo central de esta Tesis, el presente capítulo aborda el diseño, desarrollo y validación de varios sistemas de inventario y monitorización que pueden situarse dentro del abanico de soluciones IoT. Sin embargo, aunque la aplicación de los desarrollos realizados en este capítulo es muy variada, los conceptos y premisas empleados son muy similares, en tanto que el marco de trabajo es el mismo. Estas premisas fundamentales de los sistemas desarrollados incluyen características comunes como el bajo coste, el tamaño reducido, la alta autonomía y la fácil instalación.

El primero de los desarrollos realizados ha sido un sistema de inventario de señales de tráfico basado en la tecnología RFID pasiva. La utilización de esta tecnología frente a la activa supone una novedad en tanto que la pasiva no se había utilizado previamente para este tipo de aplicaciones. Además, se ha realizado una validación, tanto teórica como a nivel de simulaciones y experimental, de la viabilidad de su utilización, no sólo para el inventario de señales de tráfico en entornos de carretera sino también para entornos urbanos, por ejemplo, para el inventario del mobiliario urbano, lo que sitúa al sistema dentro de un enfoque mucho más global como sería el marco de las *Smart Cities*.

La utilización de la tecnología RFID pasiva posibilita despliegues masivos, lo cual es posible gracias al bajo coste de las etiquetas y a la ausencia de mantenimiento de las mismas, ya que no cuentan con batería interna que necesite cambiarse periódicamente. Además, el uso de esta tecnología da solución a los problemas fundamentales presentados por las tecnologías utilizadas tradicionalmente, como el procesado de imágenes, con la cual no es posible reconocer e inventariar las señales ante la presencia de obstáculos o condiciones de baja visibilidad, posibilitando su uso únicamente durante el día y en condiciones muy favorables. Además, la arquitectura definida para el diseño propuesto permite el uso de esta tecnología como sistema de navegación alternativo al GPS, muy útil en condiciones de baja cobertura, como, por ejemplo, en los túneles. Por otro lado, la utilización de RFID pasivo, el cual se rige por estándares abiertos, garantiza la globalización de los servicios ofrecidos sin necesidad de depender de un fabricante.

Lo expuesto en los párrafos anteriores pone de manifiesto la sinergia existente entre la tecnología RFID pasiva e IoT, garantizando que las soluciones ofrecidas por la tecnología encajan perfectamente dentro de los requisitos IoT, resultando ser este marco de trabajo uno de los principales escenarios de aplicación de la tecnología RFID pasiva.

El segundo desarrollo ha consistido en el diseño de un sistema de monitorización de correas de ascensores basados en el principio fundamental de los reflectómetros. Se trata de un sistema que aprovecha la desadaptación de las impedancias de una línea de transmisión para detectar y localizar fallos o defectos en las correas de los ascensores midiendo el retraso entre la señal transmitida y la reflexión de la misma. Además, se han utilizado técnicas basadas en *compressive sensing* para lograr una mayor resolución espacial, sin necesidad de aumentar el coste del sistema y minimizando la cantidad de información transmitida hacia la nube. Esto da lugar a un sistema de monitorización de correas de dispositivos con aplicación en el transporte vertical y con capacidad de detección y localización de fallos en las mismas en tiempo real, posibilitando el desarrollo de servicios de gestión del inventario de la entidad propietaria así como el de servicios de mantenimiento predictivo, lo que pone manifiesto, de nuevo, la sinergia entre el sistema desarrollado e IoT.

Finalmente, se ha desarrollado un sistema distribuido de monitorización de salud estructural aplicable a la infraestructura civil y basado en algoritmos estocásticos.

Se trata de un diseño de muy bajo coste con capacidad de monitorizar y extraer las características fundamentales, desde el punto de vista estructural, de las infraestructuras civiles. Se trata, así mismo, de una monitorización en tiempo real y con capacidad de procesado local que minimiza la cantidad

de información a transmitir a la nube para que, apoyada con uno o varios algoritmos SHM, doten al sistema global de la capacidad de detectar comportamientos anómalos así como daños estructurales.

El desarrollo de muy bajo consumo realizado junto la utilización de redes inalámbricas de bajo consumo, posibilitan, por un lado, el despliegue de una red de nodos de alta densidad minimizando los costes de instalación y, por otro lado, la operatividad de la misma de forma desatendida minimizando los costes de mantenimiento. Además, el procesamiento local disminuye la cantidad de información inalámbrica a transmitir, minimizando el consumo de la misma, lo que tiene un impacto significativo en la vida útil de cada nodo. Este envío de la información posibilita el procesamiento de la misma, en remoto y en tiempo real, lo que habilita la utilización de máquinas de procesamiento tan potentes como sea necesario, maximizando las posibilidades de la red desplegada.

Además, el despliegue global de este tipo de sistemas sobre la infraestructura civil de un área o ciudad lo incorporaría directamente al marco de las *Smart Cities*, lo que lo incluye dentro del catálogo de soluciones IoT.

Por tanto, a modo de resumen, se puede concluir que los desarrollos propuestos en este capítulo presentan soluciones a aplicaciones en el marco IoT que evidencian algunos de los retos planteados por este nuevo paradigma, tales como son la minimización del consumo, la reducción del coste de los dispositivos, la minimización de la cantidad de información transmitida, el procesamiento local o la capacidad de comunicación en tiempo real.

4.5. Referencias

- [4 - 1] Roberti, M. (2014, 1 diciembre). Internet of Things: Promise and Peril for the RFID Industry. RFID Journal. <https://www.rfidjournal.com/articles/view?12471>.
- [4 - 2] Arcadius Tokognon, C., Gao, B., Tian, G. Y., & Yan, Y. (2017). Structural Health Monitoring Framework Based on Internet of Things: A Survey. IEEE Internet of Things Journal, 4(3), 619–635. <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2664072>.
- [4 - 3] García Oya, J., Martín Clemente, R., Hidalgo Fort, E., González Carvajal, R., & Muñoz Chavero, F. (2018). Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments. Sensors, 18(7), 2385.
- [4 - 4] Hidalgo, E.; Munoz, F.; de Mier, A.G.; Carvajal, R.G.; Martin-Clemente, R. Wireless Inventory of Traffic Signs based on Passive RFID Technology. In Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Vienna, Austria, 10–14 November 2013; pp. 5467–5471.
- [4 - 5] Villalón-Sepúlveda, G.; Torres-Torriti, M.; Flores-Calero, M. Traffic Sign Detection System for Locating Road Intersections and Roundabouts: The Chilean Case. Sensors 2017, 17, 1207.
- [4 - 6] Hoang, T.M.; Baek, N.R.; Cho, S.W.; Kim, K.W.; Park, K.R. Road Lane Detection Robust to Shadows Based on a Fuzzy System Using a Visible Light Camera Sensor. Sensors 2017, 17, 2475.
- [4 - 7] Yu, Y.; Li, J.; Guan, H.; Wang, C. Automated Extraction of Urban Road Facilities Using Mobile Laser Scanning Data. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2015, 16, 2167–2181.
- [4 - 8] Islam, K.T.; Raj, R.G. Real-Time (Vision-Based) Road Sign Recognition Using an Artificial Neural Network. Sensors 2017, 17, 853.

- [4 - 9] Balali, V.; Jahangiri, A.; Ghanipoor Machiani, S. Multi-class US traffic signs 3D recognition and localization via image-based point cloud model using color candidate extraction and texture-based recognition. *J. Adv. Eng. Inform.* 2017, 32, 263–274.
- [4 - 10] Timofte, R.; Zimmermann, K.; Van Gool, L. Multi-view traffic sign detection, recognition, and 3D localisation. *Mach. Vis. Appl.* 2014, 25, 633–647.
- [4 - 11] Balali, V.; Ashouri Rad, A.; Golparvar-Fard, M. Detection, classification, and mapping of U.S. traffic signs using google street view images for roadway inventory management. *J. Vis. Eng.* 2015, 15, 1–18.
- [4 - 12] Sato, Y.; Makane, K. Development and Evaluation of In-Vehicle Signing System Utilizing RFID Tags as Digital Traffic Signals. *Int. J. ITS Res.* 2006, 4, 53–58.
- [4 - 13] Mariut, F.; Fosalau, C.; Zet, C.; Petrisor, D. Experimental Traffic Sign Detection using I2V Communication. In *Proceedings of the 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 3–4 July 2012; pp. 141–145.
- [4 - 14] Paul, A.; Bharadwaj, N.; Bhat, A.S.; Shroff, S.; Seenanna, V.; Sitharam, T.G. Design and Prototype of an In-Vehicle Road Sign Delivery System using RFID. In *Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications*, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2012; pp. 220–225.
- [4 - 15] Pérez, J.; Seco, F.; Milanés, V.; Jiménez, A.; Díaz, J.C.; De Pedro, T. An RFID-based intelligent vehicle speed controller using active traffic signals. *Sensors* 2010, 10, 5872–5887.
- [4 - 16] Song, X.; Li, X.; Tang, W.; Zhang, W.; Li, B. A Hybrid Positioning Strategy for Vehicles in a Tunnel Based on RFID and In-Vehicle Sensors. *Sensors* 2014, 14, 23095–23118.
- [4 - 17] Wang, J.; Li, K. RFID-Based Vehicle Positioning and Its Applications in Connected Vehicles. *Sensors* 2014, 14, 4225–4238.
- [4 - 18] Prinsloo, J.; Malekian, R. Accurate Vehicle Location System Using RFID, an Internet of Things Approach. *Sensors* 2016, 16, 825.
- [4 - 19] Ali, A.A.; Hussein, H.A. Traffic Lights System Based on RFID for Autonomous Driving Vehicle. In *Proceedings of the Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT)*, Baghdad, Iraq, 7–9 March 2017; pp. 122–127.
- [4 - 20] Mandal, K.; Sen, A.; Chakraborty, A.; Roy, S.; Batabyal, S.; Bandyopadhyay, S. Road Traffic Congestion Monitoring and Measurement using Active RFID and GSM Technology. In *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Washington, DC, USA, 5–7 October 2011; pp. 1375–1379.
- [4 - 21] Sundar, R.; Hebbar, S.; Golla, V. Implementing Intelligent Traffic Control System for Congestion Control, Ambulance Clearance, and Stolen Vehicle Detection. *IEEE Sensors J.* 2015, 15, 1109–1113.

- [4 - 22] DiGiampaolo, E.; Martinelli, V. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2012, 59, 3961–3970.
- [4 - 23] Hoffman, A.J.; Pretorius, A.; Wang, Y. Geometry based analysis of an alternative RFID interrogator placement for electronic vehicle identification. In *Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Las Palmas, Spain, 15–18 September 2015; pp. 2390–2397.
- [4 - 24] Larionov, A.A.; Ivanov, R.E.; Vishnevsky, V.M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation. *IEEE J. Radio Freq. Identif.* 2017, 1, 3–12.
- [4 - 25] Park, S.; Lee, H. Self-Recognition of Vehicle Position Using UHF Passive RFID Tags. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 226–234.
- [4 - 26] Wang, Y.; Bialkowski, K.S.; Pretorius, A.J.; Du Plooy, A.G.; Abbosh, A.M. In-Road Microwave Sensor for Electronic Vehicle Identification and Tracking: Link Budget Analysis and Antenna Prototype. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2018, 19, 123–128.
- [4 - 27] Małecki, K.; Kopaczyk, K. RFID-Based Traffic Signs Recognition System. In *Proceedings of the International Conference on Transport Systems Telematics*, Ustron, Poland, 23–26 October 2013; pp. 115–122.
- [4 - 28] Song, J.-H.; Jee, G.-I. Performance Enhancement of Land Vehicle Positioning Using Multiple GPS Receivers in an Urban Area. *Sensors* 2016, 16, 1688.
- [4 - 29] Solic, P.; Blazevic, Z.; Skiljo, M.; Patrono, L.; Colella, R.; Rodrigues, J.J. Gen2 RFID as IoT Enabler: Characterization and Performance Improvement. *IEEE Wireless Commun.* 2017, 24, 33–39.
- [4 - 30] García-Garrido, M.A.; Ocana, M.; Llorca, D.F.; Arroyo, E.; Pozuelo, J.; Gavilán, M. Complete Vision-Based Traffic Sign Recognition Supported by an I2V Communication System. *Sensors* 2012, 12, 1148–1169.
- [4 - 31] Cheng, W.; Wang, S.; Cheng, X. Virtual Track: Applications and Challenges of the RFID System on Roads. *IEEE Netw.* 2014, 28, 42–47.
- [4 - 32] Zuffanelli, S.; Aguila, P.; Zamora, G.; Paredes, F.; Martin, F.; Bonache, J. A High-Gain Passive UHF-RFID Tag with Increased Read Range. *Sensors* 2016, 16, 1150.
- [4 - 33] Park, C.R.; Eom, K.H. RFID Label Tag Design for Metallic Surface Environments. *Sensors* 2011, 11, 938–948.
- [4 - 34] Hamani, A.; Yagoub, M.C.; Vuong, T.P.; Touhami, R. A Novel Broadband Antenna Design for UHF RFID Tags on Metallic Surface Environments. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 91–94.
- [4 - 35] Hancke, G.P.; Hancke, G.P., Jr. The Role of Advanced Sensing in Smart Cities. *Sensors* 2013, 13, 393–425.

- [4 - 36] Mora, H.; Gilart-Iglesias, V.; Pérez-del Hoyo, R.; Andújar-Montoya, M.D. A Comprehensive System for Monitoring Urban Accessibility in Smart Cities. *Sensors* 2017, 17, 1834.
- [4 - 37] RFID Journal. Available online: <https://www.rfidjournal.com/faq/show?85>.
- [4 - 38] AMI Track. Available online: <http://www.amitracks.com/2013/10/simple-cost-analysis-for-rfid-options/>.
- [4 - 39] Griffin, J.D.; Durgin, G.D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2009, 51, 11–25.
- [4 - 40] Balanis, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed.; Wiley: New York, NY, USA, 2016; ISBN 978-1118642061.
- [4 - 41] Aroor, S.R.; Deavours, D.D. Evaluation of the State of Passive UHF RFID: An Experimental Approach. *IEEE Syst. J.* 2007, 1, 168–176.
- [4 - 42] Bocus, M.Z.; Dettmann, C.; Coon, J.P. An approximation of the first order Marcum Q-function with application to network connectivity analysis. *IEEE Commun. Lett.* 2013, 17, 499–502.
- [4 - 43] EPCglobal. Radio-Frequency Identity Protocols, Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz–960 MHz, Version 1.2.0. Specification for RFID Air Interface. 2008. Available online: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhf1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf.
- [4 - 44] Dobkin, D. *The RF in RFID*, 2nd ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 2012; ISBN 978-0123945839.
- [4 - 45] Jin, C.; Cho, S.H.; Jeon, K.Y. Performance Evaluation of RFID EPC Gen2 Anti-collision Algorithm in AWGN Environment. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, China, 5–8 August 2007; pp. 2066–2070.
- [4 - 46] Ukkonen, L.; Sydänheimo, L.; Kivikoski, M. Effects of Metallic Plate Size on the Performance of Microstrip Patch-Type Tag Antennas for Passive RFID. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2005, 4, 410–413.
- [4 - 47] H. M. Hashemian, “State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 1, pp. 226–236, Jan. 2011.
- [4 - 48] H. Lei et al., “Broken Wires Inspection for Coated Steel Belts in Elevator System Using MFL Method,” *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, pp. 252–254, 2014.
- [4 - 49] Sun et al., (2018) “Elevator Cord health Monitorig”, US Patent 9,862,571 B2.
- [4 - 50] Fargo, R.N., (2013) “Simplified Resistance Based Belt Inspection”. US Patent 08807286 B2.

- [4 - 51] O. Yaman and M. Karakose, "Auto Correlation Based Elevator Rope Monitoring and Fault Detection Approach with Image Processing," Intern. Artificial Intelligence and Data Processing Symp., pp. 1-5, 2017.
- [4 - 52] Hook, W.R. (1998) "Apparatus and Methods for Time Domain Reflectometry". US Patent 5.726.578.
- [4 - 53] D. Trebbels et al., "Miniaturized FPGA-Based High-Resolution Time-Domain Reflectometer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 62, no. 7, pp. 2101-2113, Jul. 2013.
- [4 - 54] Q. Shi, O. Kanoun, "Wire Fault Diagnosis in the Frequency Domain by Impedance Spectroscopy," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 64, no. 8, pp. 2179-2187, Aug. 2015.
- [4 - 55] http://www.mplifts.com/portal/en_UK/web/guest/productos.
- [4 - 56] Z. Du et al., "Feature Identification With Compressive Measurements for Machine Fault Diagnosis," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 65, no. 5, pp. 977-987, May 2016.
- [4 - 57] A. Naha et al., "Low Complexity Motor Current Signature Analysis Using Sub-Nyquist Strategy With Reduced Data Length," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 66, no. 12, pp. 3249-3259, Dec. 2017.
- [4 - 58] E. Candes, "Compressive Sampling," Proceedings of the International Congress of Mathematicians, pp.1-20, 2006.
- [4 - 59] Q. Shi, O. Kanoun, "A New Algorithm for Wire Fault Location Using Time-Domain Reflectometry," IEEE Sensors J., vol. 14, no. 4, pp. 1171-1178, Apr. 2014.
- [4 - 60] S. Sun et al., "A Novel TDR-Based Coaxial Cable Sensor for Crack/Strain Sensing in Reinforced Concrete Structures," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 8, pp. 2714-2725, Aug. 2009.
- [4 - 61] L. A. Griffiths et al., "The Invisible Fray: A Critical Analysis of the Use of Reflectometry for Fray Location," IEEE Sensors J., vol. 6, no. 3, pp. 697-706, Jun. 2006.
- [4 - 62] Y. Shin et al., "Application of Time-Frequency Domain Reflectometry for Detection and Localization of a Fault on a Coaxial Cable," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 54, no. 6, pp. 2493-2500, Dec. 2005.
- [4 - 63] C. Lo, C. Furse, "Noise-Domain Reflectometry for Locating Wiring Faults," IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. 47, no. 1, pp. 97-104, Feb. 2005.
- [4 - 64] P. Smith, C. Furse, J. Gunther, "Analysis of Spread Spectrum Time Domain Reflectometry for Wire Fault Location," IEEE Sensors J., vol. 5, no. 6, pp. 1469-1478, Dec. 2005.
- [4 - 65] A. Cunha, and E. Caetano, "Experimental modal analysis of civil engineering structures," Sound and Vibration, June 2006.
- [4 - 66] J.P. Lynch, "An overview of wireless structural health monitoring for civil structures". 2006.

- [4 - 67] Maser, K., Egri, R., Lichtenstein, A., and Chase, S., "Field Evaluation of a Wireless Global Bridge Evaluation and Monitoring System," in Proceedings of the 11th Conference on Engineering Mechanics, Fort Lauderdale, FL, May 19–22, Vol. 2, 955–958, 1996.
- [4 - 68] Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S., "A Modular, Wireless Damage Monitoring System for Structures," Technical Report 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, 1998.
- [4 - 69] Bennett, R., Hayes-Gill, B., Crowe, J. A., Armitage, R., Rodgers, D., and Hendroff, A., "Wireless Monitoring of Highways," in Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Newport Beach, CA, March 1–2, Proceedings of the SPIE, Vol. 3671, 173–182, 1999.
- [4 - 70] [Sohn et al. [SHM3], de BioT] H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, D.D. Shunk, D. W. Stinemat, B.R. Nadler. (2003) A review of Structural Health Monitoring literature: 1996-2001. Technical Report LA-13976-MS, UC-900. Los Alamos National Laboratory.
- [4 - 71] [Farrar and Worden [SHM4] de BioT] Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. <https://doi.org/10.1002/9781118443118>.
- [4 - 72] [OMA1] Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0767-0>.
- [4 - 73] [OMA2] Brincker, R., & Ventura, C. (2015). Introduction to Operational Modal Analysis. <https://doi.org/10.1002/9781118535141>.
- [4 - 74] [OMA3] Au, S. K. (2017). Operational Modal Analysis: Modeling, Bayesian Inference, Uncertainty Laws. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4118-1>.
- [4 - 75] P.C. Chang, A. Flatau and S.C. Liu, "Review paper: Health monitoring of civil infrastructure," Structural Health Monitoring, vol. 2(3), pp. 257–267, 2003.
- [4 - 76] M.I. Friswell, J.E. Mottershead, Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [4 - 77] Hidalgo, E., Munoz, F., De Mier, A. G., Carvajal, R., Castro, R., & Gallego, R. (2011). "Structural Damage Assessment by using Wireless Sensors". DCIS 2011 – 26th Annual Conference on Design of Circuits and Integrated Systems.
- [4 - 78] H. Sohn, C.R.Farrar, "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals". September 2000.
- [4 - 79] N. Xu, S. Rangwala, K. K. chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan y D. Estrin, 2004. "A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring".
- [4 - 80] J. P. Lybch, A. Sundararajan, K. H. Law, A. S. Kiremidjian, E. Carryer, H. Sohn y C. R. Farrar, 2003. "Field validation of a wireless structural monitoring system on the Alamosa Canyon Bridge".

- [4 - 81] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, The Finite Element Method. Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K., 5th ed., vols. I, II, 2000 .
- [4 - 82] Hidalgo, E., Munoz, F., De Mier, A. G., Carvajal, R., Torralba, A., Castro, R., & Gallego, R. (2012). "Wireless Structural Health Monitoring system based on Autoregressive models". IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, . <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6389095>.
- [4 - 83] Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02: Parte General y Edificación. BOE núm. 244. Viernes, 11 de octubre de 2002.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

CONCLUSIONES	222
CONCLUSIONS	223
LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	224
FUTURE LINES OF RESEARCH	225
PUBLICACIONES DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS	226
PUBLICACIONES INDIRECTAMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS	227

Este capítulo recoge las principales contribuciones y conclusiones de esta Tesis Doctoral así como las posibles futuras líneas de investigación. Se teminará listando una serie de publicaciones fruto del trabajo de investigación realizado.

5.1. Conclusiones

Esta Tesis Doctoral explota los beneficios de la arquitectura IoT para una sociedad demandante, cada vez más, de servicios de valor añadido aplicados al bienestar social y a la vida diaria. Para ello, a lo largo de la Tesis, se presentan aportaciones originales empleadas en aplicaciones con un impacto relevante en la economía y la sociedad, como es el transporte y las infraestructuras. Las contribuciones realizadas, las cual se exponen a continuación, han sido previamente estudiadas teóricamente y, posteriormente, validadas experimentalmente, y constituyen un paso importante en el estado del arte, ya que han sido seleccionados casos de uso que ponen de manifiesto los principales desafíos tecnológicos que presenta el paradigma IoT.

En la Tesis se ha identificado el transporte de mercancías como una aplicación futura esencial del IoT, de forma que en el Capítulo 2, se lleva a cabo el desarrollo de un sistema de monitorización y control inteligente de contenedores de mercancías. Dicho sistema presenta las siguientes características:

- Sistema abierto en todas sus capas.
- Sistema global.
- Bajo consumo.
- Bajo coste.
- Capacidad de medida de cualquier variable física (temperatura, humedad, luminosidad, estado de puertas, GPS y detección de movimiento ya instaladas en los dispositivos).
- Capacidad de integración en catálogo de redes de telecomunicación heterogéneo (locales, móviles o satélites).
- Integración en la *nube*.
- Integración con servicios de valor añadido de terceros.

Por tanto, se trata de un dispositivo totalmente integrado en la arquitectura IoT y puede beneficiarse de las bondades que este paradigma ofrece, tales como amplia conectividad, integración en redes de dispositivos de mayor entidad (*Smart City*, *IIoT*, etc.), gran capacidad de procesamiento (*Big Data*) e inclusión en servicios de valor añadido globales.

Durante el desarrollo de la plataforma IoT para el transporte de mercancías presentado en el capítulo 2 se identificó una necesidad del mercado, estando dedicado el siguiente capítulo al diseño de una interfaz de comunicaciones eficiente y fiable mediante ultrasonidos. El objeto de este canal de comunicaciones por ultrasonidos radica en sustituir la interfaz de comunicación cableada entre el interior y el exterior de los contenedores con el objetivo de evitar perforaciones en los mismos manteniendo su estanqueidad y facilitando su instalación. Para ello se ofrecen varias aportaciones originales utilizando transmisión ultrasonidos basada en transductores piezoeléctricos.

Tras validar el desarrollo realizado teórica y experimentalmente, se realizan dos nuevas contribuciones fruto de dos nuevas líneas de investigación derivadas de la búsqueda de la minimización del consumo de la interfaz ultrasonidos.

- Por un lado, la primera línea, basada en la optimización de la fijación magnética del piezoeléctrico por y la sustitución de la etapa moduladora por una etapa puramente digital, apoyándose en la característica de filtro LP que presenta el canal de comunicaciones, logra minimizar significativamente el consumo de potencia manteniendo el ancho de banda.
- Por otro lado, la otra línea de investigación se basa en la utilización de la fijación del transductor mediante epoxi, la utilización de modulaciones multi-portadora y la explotación de la nueva banda que aparece en la caracterización del canal. Su implementación consigue minimizar, aún más que la anterior línea de investigación, la potencia consumida por la cadena de transmisión, así como aumentar significativamente el ancho de banda del sistema de comunicación.

Por tanto, estos 3 desarrollos se presentan como soluciones eficientes y competitivas para la problemática presentada.

A lo largo del Capítulo 4 se expone el desarrollo de nuevos sistemas IoT con sus correspondientes aportaciones originales al estado de la técnica. Por un lado se presenta un sistema de inventario de señales de carretera y navegación en tiempo real basado en la tecnología RFID pasiva, la cual, frente a los sistemas de reconocimiento por imágenes tradicionales, posibilita su utilización durante la noche y en condiciones de baja visibilidad y, frente a los RFID activos, se presenta como una solución más económica (en adquisición y mantenimiento) a la vez que estandarizada (no dependencia de un fabricante). La principal aportación realizada durante este desarrollo es, por un lado el desarrollo teórico de los modelos de comportamiento, incluyendo las reflexiones multitrayecto y la velocidad del vehículo de inventario y, por otro lado la validación en campo verificando su correcto funcionamiento tanto en carretera como entornos urbanos sin afectar al flujo del tráfico y abriendo nuevas posibles soluciones como el inventario de instalaciones urbanas y comunicación I2V.

Otra de las soluciones presentadas en el capítulo 4 está enfocada al diagnóstico de las correas de los ascensores. Para ello, utilizando reflectometría y técnicas de *Compressive Sensing*, se consigue, por un lado, minimizar la cantidad de datos enviados inalámbricamente a la nube (minimización del consumo) para su procesamiento en tiempo real gracias al Big Data y, por otro lado, detectar anomalías y daños estructurales en las correas en tiempo real, alcanzando una precisión de hasta 9 cm, en una correa de 160m.

Finalmente se detalla el desarrollo de un sistema SHM de bajo consumo, el cual, a partir de las vibraciones de las estructuras, y aprovechando la capacidad computacional ofrecida por IoT (*Big Data*), aplica algoritmos basados AR-ARX para la detección tanto de comportamiento anómalos como daños estructurales. La validación del sistema se realizó sobre sendas estructuras que emulan un puente y un edificio de cinco plantas, demostrando la detección de dichos daños y la no detección de falsos positivos.

Finalmente, es necesario destacar que las aportaciones originales anteriormente comentadas resultan ser el elemento principal sobre el que se sustentan las soluciones innovadoras desarrolladas a lo largo de esta Tesis Doctoral, y son la base que ha dado lugar tanto a 1 patente nacional como a numerosas publicaciones internacionales.

5.2. Conclusions

This thesis exploits the benefits of IoT architecture for an ever-more demanding society in terms of services which improve social wellbeing and daily life. To achieve this, several innovative contributions are made in practical applications with relevant impact on the economy and society, like transport and infrastructures fields. These contributions, presented below and as it shows in Chapter 1, have been the subject of theoretical study and subsequent experiential validation, and are considered critical for the advancement of the state of art, as they have been chosen based on their highlighting the technological challenges that the widespread implementation of IoT infrastructure presents.

Due to the importance of the transport of goods in today's economy, Chapter 2 details the development of an open, global, low power consumption and low cost intelligent monitoring system for freight containers, offering services such as integration of different physical values (temperature, relative humidity, GPS, pre-installed movement detection) and the transmission of these data to the cloud through local, mobile and satellite networks. In the cloud, this data can be exploited for value adding services in an open interface, as well as by third parties for developing new services. In effect, this process is fully integrated in the IoT architecture, and as such benefits from widespread

connectivity, integration in networks of larger processes (Smart City, IIoT etc...) with greater processing power (Big Data) and potential inclusion value-adding global services.

Chapter 3 focuses on replacing the wired communication interface connecting the interior of containers with the outside world, with the objective of avoiding perforating them and relying on an interface where the communication channel is subject to mechanical stress. For this purpose, innovative solutions are developed based on the use of ultrasound transmission by way of piezoelectric transceivers. After initial validation of the process, the requirement of minimising energy consumption leads to two additional updates. The first one is, after the channel characterization, to implement a novel scheme of DBPSK modulator base on flip-flops and NAND logical doors and using the LP response of communication channel, resulting in a significant reduction in energy consumption whilst maintaining bandwidth. The second one is based on the use of epoxi resin to fix the transceiver to the container, as well as the use of multicarrier OFDM modulation and the exploitation of the new frequency band appeared which has a higher gain and bandwidth, which results in a reduction in energy consumption of the transmission chain in three orders of magnitude and in a significant increase in bandwidth. As a result, these three developments are considered competitive solutions to the original constraint.

Chapter 4 describes the development of new IoT systems and its contributions to the state of art. First, an real time inventory system for road signs and navigation is presented using passive RFID technology which, unlike its image-based predecessors allows for nighttime and low visibility operation. This method is also cheaper than those based on active RFID, both in terms of purchasing and maintenance, as well as being non-proprietary (not dependant on a single supplier). The development of this process adds value through its development of theoretical behavioral models, including multipath propagation and moving vehicle. Moreover, field testing support its use both on the roadside and urban environments without disrupting traffic and creates new possibilities such as inventory in urban facilities and I2V communication.

Other solution presented in chapter 4 consist in the elevator belt diagnostics. The use of reflectometry and Compressive Sensing techniques allows for the minimization of data sent wirelessly to the cloud (lower energy consumption) for processing in real time using Big Data. This, in turn, makes real time anomaly and structural damage detection of the belts possible with a level of precision up to 9cm on a 160m belt. Lastly, a detailed account of the development of a low cost and energy efficient SHM system is given, which, by detecting vibrations in the structures, and exploiting the processing power provided by IoT (Big Data), applies AR-ARX based algorithms in order to detect abnormal behavior as well as structural damages. The validation of the system was performed on structures which emulate a bridge and a five-story building, demonstrating the detection of damage and an absence of false positives.

Finally, it is critical to point out this Thesis' contributions described above are the main element on which the innovative solutions presented in this thesis were founded and were also the origin of a national patent as well as several national publications.

5.3. Líneas futuras de investigación

Partiendo de la base de que en la presente Tesis Doctoral se han desarrollado varios sistemas bajo un mismo paradigma, el de IoT, una de las futuras líneas de investigación sería la integración de todos aprovechando las sinergias que pudiesen aparecer entre ellos bajo el concepto de *Smart City* o *IIoT* y desarrollar las aplicaciones o servicios de alto nivel necesarios para la explotación de la información combinada de los sistemas presentados.

Por otro lado, continuando con la línea de desarrollo de sistemas de bajo consumo seguida a lo largo de esta Tesis Doctoral, uno de los retos más importantes que presenta el despliegue masivo del paradigma IoT es la cantidad de energía y número de baterías necesarias para proporcionar a los billones de dispositivos que se esperan a corto-medio plazo. Hoy en día, la cantidad de baterías necesarias para alimentarlos está por encima de la capacidad de producción a lo que hay que añadir las baterías que se deban ir reemplazando. Esto daría lugar a varias líneas de investigación importantes. Por un lado, ya está acuñado el término *Battery-Less IoT* que apuesta por el diseño de nuevas estructuras y circuitos electrónicos que posibiliten el funcionamiento de los dispositivos captando del entorno suficiente energía para realizar la tarea para la que estén diseñados y posteriormente apagarse y así sucesivamente. Por tanto, continuar la investigación en esta línea estaría justificado por tratarse de una necesidad existente sobre la que se aportarían soluciones orinales, en tanto que el catálogo existente es muy reducido e insuficiente. Por otro lado, los sistemas que cuentan con batería implican un coste de mantenimiento derivado de la sustitución de las mismas una vez que se agotan o la sustitución del propio dispositivo lo que, escalado a decenas de billones de dispositivos, supone un coste demasiado elevado. Por tanto, hoy en día, la apuesta por el desarrollo de sistemas de *Energy Harvesting* de pequeña escala que permitan mantener dichas baterías garantiza situar la investigación en una necesidad actual sobre la que el estado del arte necesita avanzar.

En lo que SHM se refiere, desde finales de los años 1990 se han sucedido distintas soluciones, las cuales no han podido superar los retos tecnológicos presentados. Si inicialmente el principal problema era la comunicación de los dispositivos, hoy en día el principal reto está ubicado en el desarrollo de algoritmos de diagnóstico de la salud estructural capaces de cubrir hasta el cuarto nivel de la escala de sistemas SHM, esto es hasta ser capaces de realizar prognosis sobre la estructura, lo que abriría una nueva dimensión para este campo. Las técnicas y la capacidad de cálculo ofrecidas por el *Big Data*, el *Cloud Computing* o incluso el emergente *Fog Computing*, permiten afrontar el cálculo de algoritmos que no era posible hasta la fecha. Por tanto, partiendo de sistemas SHM como el presentado en esta Tesis Doctoral, se sitúa a la comunidad científica en un momento óptimo para afrontar este reto como nueva línea de investigación.

Finalmente, antes de realizar la última propuesta, cabe comentar que todos los desarrollos realizados en esta Tesis Doctoral se sitúan bajo el concepto IoT, el cual es tan amplio que ofrece infinitas posibilidades de aplicación. Por tanto, una nueva línea de investigación puede centrarse en la adaptación de los sistemas desarrollados a lo largo de esta Tesis para su aplicación en un campo distinto al que fueron concebidos. Algunos ejemplos de esto podría ser la aplicación del sistema SHM a aerogeneradores o torres de alta tensión, el sistema de inventario RFID al guiado en zonas urbanas donde no existe cobertura GPS o al guiado de barcos en la vía del Guadalquivir para evitar el encallado, entre otros.

5.4. Future lines of research

Given that this Doctoral Thesis has developed several systems under the same paradigm, that of IoT, a potential future line of investigation would be their integration, making the most of the synergies which may appear between them *bajo del concepto de Smart City* or *IIoT*, as well as the development of applications or services necessary in order to exploit the combined information provided by these systems.

Secondly, one of the most important obstacles to widespread implementation of IoT is the energy consumption and battery power needed to power the billions of devices expected in the short-mid term. As it stands, the amount of batteries necessary is above our capacity of production, not to mention those batteries which will need replacement. This opens the way for several lines of investigation. On the one hand, the term *Batteryless IoT* has already been coined, describing the design

of new structures whose electrical circuits make possible the functioning of the devices possible on an intermittent basis: capturing enough energy from the environment in order to perform their task, before shutting down, and repeating. Given the paucity of solutions in this area, continued investigation is critical. On the other hand, those systems that are battery powered entail a maintenance cost derived from the replacement of the batteries. Once scaled to the billions of devices expected, this supposes too high a cost. For this reason, the development of small scale Energy Harvesting systems which would facilitate the maintenance of these batteries would ensure that research in the field has to follow in this way in order to contribute to the state of the art with novel solutions.

With respect to SHM, various methods have been developed successively since the end of the 1990s. None, however, have been able to solve technological constraints listed in this thesis. While, originally, the main problem was communication between devices, today the principal constraint lies in the development of diagnostic algorithms for structural health capable of reaching the fourth level on the scale of SHM systems: in other words, the ability to provide prognosis for the structure, which would break new ground for this field. The techniques and computing capacity offered by Big Data, Cloud Computing and even the emergin Fog computing provide the capacity for algorithm calculation which up until now was impossible. As such, the scientific community has been presented with the optimal tools to meet this technological constraint.

Lastly, it should be noted that all the developments presented are in the paradigm of IoT, which is so vast that it offers limitless possibilities for application. For this reason, a new line of investigation could focus on the adaptation of the systems developed in this thesis for application in a different field. Examples include adapting the SHM system to aerogenerators or high voltage towers, or applying the RFID inventory system to navigation in urban areas where there is no GPS coverage, or indeed to ship navigation in the Guadalquivir river to avoid ships running aground.

5.5. Publicaciones directamente relacionadas con la tesis

5.5.1. Artículos de Revista Internacionales con JRC

- [5 - 1] **Hidalgo Fort, E.**, Garcia Oya, J. R., Munoz Chavero, F., & Gonzalez Carvajal, R. (2018). Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8), 2734–2738. <https://doi.org/10.1109/its.2017.2745717>.
- [5 - 2] Garcia Oya, J. R., Algueta Miguel, J. M., Garcia Doblado, J., Munoz Chavero, F., **Hidalgo Fort, E.**, Baena Lecuyer, V., & Lopez Martin, A. J. (2018). Subsampling OFDM-Based Ultrasonic Data Communication Through Metallic Channels for Monitoring of Cargo Containers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, , 1–6. <https://doi.org/10.1109/its.2018.2882565>.
- [5 - 3] Algueta-Miguel, J. M., Garcia-Oya, J. R., Lopez-Martin, A. J., Blas, C. A. D. L. C., Chavero, F. M., & **Hidalgo-Fort, E.** (2019). Low-Power Ultrasonic Front-End for Cargo Container Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, , 1. <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2939704>.
- [5 - 4] García Oya, J., Martín Clemente, R., **Hidalgo Fort, E.**, González Carvajal, R., & Muñoz Chavero, F. (2018). Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments. *Sensors*, 18(7), 2385. <https://doi.org/10.3390/s18072385>.

5.5.2. Patentes

- [5 - 5] Gonzalez, R., **Hidalgo-Fort, E.**, Oya, J.R., Muñoz, F., Onieva, Luis, Cortes, P., Guadix, J., Muñuzuri, J., (2017) “Sistema y método de monitorización de contenedores de carga de paredes metálicas”, Patente española ES 2 639 765 A1.

5.5.3. Artículos de Revista Internacionales con JRC en fase de Revisión

- [5 - 6] García Oya, J. R., **Hidalgo, E.**, Chavero, F. M., & Carvajal, R. G. Compressive Sensing Based Reflectometer for Sparse-Faults Detection in Elevator Belts. the IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2385. (Manuscript id IM-19-23317).

5.5.4. Artículos de Congresos Internacionales

- [5 - 7] **Hidalgo-Fort, E.**, García-Doblado, J., Muñoz-Chavero, F., Baena, V., Gonzalez-Carvajal, R. OFDM Communication through Metallic Channels for Freight Tracking Applications. Comunicación en congreso. Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (2016). Granada España. 2016.
- [5 - 8] Algueta, J. M., García-Oya, J. R., García-Doblado, J., Muñoz-Chavero, F., López-Marín, A. De la Cruz Blas, C. A., Farde-Luque, M. P., Baena-Lecuyer, V, **Hidalgo-Fort, E.**, : Ultrasonic Communication through Metallic Walls for Monitoring Applications. Comunicación en congreso. XXXII Conference of Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS;2017). Barcelona, España. 2017.
- [5 - 9] **Hidalgo, E.**, Munoz, F., Guerrero de Mier, A., Carvajal, R. G., & Martin-Clemente, R. (2013). Wireless inventory of traffic signs based on passive RFID technology. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6700026>.
- [5 - 10] **Hidalgo-Fort, E.**, Munoz, F., De Mier, A. G., Carvajal, R., Castro, R., & Gallego, R. (2011). “Structural Damage Assessment by using Wireless Sensors”. DCIS 2011 – 26th Annual Conference on Design of Circuits and Integrated Systems.
- [5 - 11] **Hidalgo-Fort, E.**, Munoz, F., de Mier, A. G., Carvajal, R. G., Torralba, A., Castro, R., & Gallego, R. (2012). Wireless Structural Health Monitoring system based on Autoregressive models. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6389095>.

5.5.5. Artículos de Revista Internacionales sin JRC

- [1 - 40] Torralba, A., **Hidalgo, E.**, Peral, J. M., & Garcia, M. (2017, 6 diciembre). Tecnoport2025: Building the IoT-Connected Future in the Port of Seville. WWW.PORTTECHNOLOGY.ORG, Cyber Risk & Security(76).

5.6. Publicaciones parcialmente relacionadas con la tesis

- [5 - 12] Torralba, A., Gutierrez-Rumabo, J., Peral, J. M., Daza, D., Rodriguez-Serrano, A., **Hidalgo, E.**, Gonzalez-Romo, J.M., Castellano, M., Lujan, C., Collar, L., Escudero, A., Muñuzuri, J., Carvajal, R. G. Smart Navigation System for the Port of Seville. Comunicación en congreso. Smart Rivers 2015. Buenos Aires. 2015.

- [5 - 13] Torralba, A., Gutierrez-Rumabo, J., Peral, J. M., Daza, D., Rodriguez-Serrano, A., **Hidalgo, E.**, Gonzalez-Romo, J.M., Castellano, M., Collar, L., Escudero, A., Onieva, L., Carvajal, R. G. Smart ICTs for the enhancement of traffic logistics in the Port of Seville. Comunicación en congreso. Smart Rivers 2015. Buenos Aires. 2015.
- [5 - 14] **Hidalgo Fort, E.**, Abdelmalek, O., Hély, D., Veroulle, V., Triggering Hardware Trojans in EPC C1G2 RFID Tags. Comunicación en congreso. 1st WORKSHOP ON TRUSTWORTHY MANUFACTURING AND UTILIZATION OF SECURE DEVICES. Avignon. 2013.

CAPÍTULO 6. APÉNDICE A: PUBLICACIONES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

ARTÍCULOS DE REVISTA INTERNACIONALES	232
PATENTES	232
ARTÍCULOS DE CONGRESOS INTERNACIONALES	232
PUBLICACIONES PARCIALMENTE RELACIONADAS CON LA TESIS DOCTORAL	233
PUBLICACIONES	233

El presente apéndice recoge la lista de publicaciones internacionales que representan las aportaciones originales de esta Tesis Doctoral, las cuales han sido recogidas a lo largo del periodo doctoral tanto en publicaciones de revista como en congresos científicos internacionales así como en una patente de explotación nacional. Estas publicaciones son recogidas al final del presente capítulo. Así mismo se incluyen una serie de publicaciones parcialmente relacionadas con esta Tesis.

6.1. Artículos de Revistas Internacionales con JRC

- [6 - 1] **Hidalgo Fort, E.**, García Oya, J. R., Muñoz Chavero, F., & Gonzalez Carvajal, R. (2018). Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8), 2734–2738. <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2745717>.
- [6 - 2] García Oya, J. R., Algueta Miguel, J. M., García Doblado, J., Muñoz Chavero, F., **Hidalgo Fort, E.**, Baena Lecuyer, V., & Lopez Martin, A. J. (2018). Subsampling OFDM-Based Ultrasonic Data Communication Through Metallic Channels for Monitoring of Cargo Containers. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, , 1–6. <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2882565>.
- [6 - 3] Algueta-Miguel, J. M., García-Oya, J. R., Lopez-Martin, A. J., Blas, C. A. D. L. C., Chavero, F. M., & **Hidalgo-Fort, E.** (2019). Low-Power Ultrasonic Front-End for Cargo Container Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, , 1. <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2939704>.
- [6 - 4] García Oya, J., Martín Clemente, R., **Hidalgo Fort, E.**, González Carvajal, R., & Muñoz Chavero, F. (2018). Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments. *Sensors*, 18(7), 2385. <https://doi.org/10.3390/s18072385>.

6.2. Patentes

- [6 - 5] Gonzalez, R., **Hidalgo-Fort, E.**, Oya, J.R., Muñoz, F., Onieva, Luis, Cortes, P., Guadix, J., Muñuzuri, J., (2017) “Sistema y método de monitorización de contenedores de carga de paredes metálicas”, Patente española ES 2 639 765 A1.

6.3. Artículos en Revistas Internacionales con JRC en fase de Revisión

- [6 - 6] García Oya, J. R., **Hidalgo, E.**, Chavero, F. M., & Carvajal, R. G. Compressive Sensing Based Reflectometer for Sparse-Faults Detection in Elevator Belts. *the IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2385. (Manuscript id IM-19-23317).

6.4. Artículos de Congresos Internacionales

- [6 - 7] **Hidalgo-Fort, E.**, García-Doblado, J., Muñoz-Chavero, F., Baena, V., Gonzalez-Carvajal, R. OFDM Communication through Metallic Channels for Freight Tracking Applications. Comunicación en congreso. Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (2016). Granada España. 2016.
- [6 - 8] Algueta, J. M., García-Oya, J. R., García-Doblado, J., Muñoz-Chavero, F., López-Marín, A. De la Cruz Blas, C. A., Farde-Luque, M. P., Baena-Lecuyer, V, **Hidalgo-Fort, E.**, : Ultrasonic Communication through Metallic Walls for Monitoring Applications. Comunicación en congreso. XXXII Conference of Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS;2017). Barcelona, España. 2017.
- [6 - 9] **Hidalgo, E.**, Muñoz, F., Guerrero de Mier, A., Carvajal, R. G., & Martin-Clemente, R. (2013). Wireless inventory of traffic signs based on passive RFID technology. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6700026>.

- [6 - 10] **Hidalgo-Fort, E.**, Munoz, F., De Mier, A. G., Carvajal, R., Castro, R., & Gallego, R. (2011). "Structural Damage Assessment by using Wireless Sensors". DCIS 2011 – 26th Annual Conference on Design of Circuits and Integrated Systems.
- [6 - 11] **Hidalgo-Fort, E.**, Munoz, F., de Mier, A. G., Carvajal, R. G., Torralba, A., Castro, R., & Gallego, R. (2012). Wireless Structural Health Monitoring system based on Autoregressive models. IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6389095>.

6.5. Artículos de Revistas Internacionales sin JRC

- [6 - 12] Torralba, A., **Hidalgo, E.**, Peral, J. M., & Garcia, M. (2017, 6 diciembre). Tecnoport2025: Building the IoT-Connected Future in the Port of Seville. WWW.PORTTECHNOLOGY.ORG, Cyber Risk & Security(76).

6.6. Publicaciones parcialmente relacionadas con la Tesis Doctoral

- [6 - 13] Torralba, A., Gutierrez-Rumabo, J., Peral, J. M., Daza, D., Rodriguez-Serrano, A., **Hidalgo, E.**, Gonzalez-Romo, J.M., Castellano, M., Lujan, C., Collar, L., Escudero, A., Muñuzuri, J., Carvajal, R. G. Smart Navigation System for the Port of Seville. Comunicación en congreso. Smart Rivers 2015. Buenos Aires. 2015.
- [6 - 14] Torralba, A., Gutierrez-Rumabo, J., Peral, J. M., Daza, D., Rodriguez-Serrano, A., **Hidalgo, E.**, Gonzalez-Romo, J.M., Castellano, M., Collar, L., Escudero, A., Onieva, L., Carvajal, R. G. Smart ICTs for the enhancement of traffic logistics in the Port of Seville. Comunicación en congreso. Smart Rivers 2015. Buenos Aires. 2015.
- [6 - 15] **Hidalgo Fort, E.**, Abdelmalek, O., Hély, D., Verouille, V., Triggering Hardware Trojans in EPC C1G2 RFID Tags. Comunicación en congreso. 1st WORKSHOP ON TRUSTWORTHY MANUFACTURING AND UTILIZATION OF SECURE DEVICES. Avignon. 2013.

6.7. Publicaciones

A continuación se incluyen los artículos publicados en revistas internacionales con JRC y las patentes obtenidas. No se incluyen los artículos en revistas internacionales con JRC en fase de revisión, congresos internacionales, ni publicaciones en revistas sin JRC así como las publicaciones parcialmente relacionadas con esta Tesis Doctoral.

Artículos de revista internacionales con JRC

“Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018.

Short Papers

Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods

Eduardo Hidalgo Fort, José R. García Oya, Fernando Muñoz Chavero, *Member, IEEE*,
and Ramón González Carvajal, *Member, IEEE*

Abstract—This paper presents a prototype of a system for intermodal freight transport with electronics management of goods. The system is based on low-power wireless networks connecting intelligent containers. The proposed intelligent container can be configured with different types of sensors inside. With the objective to preserve the sealing of the container, the data collected inside the container are transmitted through a metal communication channel based on ultrasonic techniques. Outside the container, the implemented system is composed by a long range and low-power scalable wireless network. Finally, a management subsystem has been designed for tracking, monitoring, and alarm reporting.

Index Terms—Intelligent containers, intermodal transport, metallic barriers, piezoelectric transducers, tracking, ultrasonic communication, wireless sensor networks.

I. INTRODUCTION

NOWADAYS, almost 90% of the world trade is carried by cargo containers using different means of transportation, including railways, air, trucks and ships [1], making a huge impact on global economy. For example, transport sector generates around 7% of the European GDP (Gross Domestic Product) and almost 5% employment in the European Union [2]. Particularly, maritime transport means the most dominant mode of freight transport, with over 16 million containers in transit through the world daily [1]. Another example is the fact that 6 out of 10 main cities in the world have a port dedicated to freight transactions [3], providing a high impact over their economies.

Therefore, there is a trend to continuously improve the efficiency of this sector in ports and terminals, by the implementation of “intelligent containers.” An “intelligent container” will allow interconnectivity between actors and activities in the intermodal freight system and the logistics network via wireless communication and sensing capabilities. Moreover, an “intelligent container” does not only measure and transmit the information, but also makes decisions locally to enhance the operational performance and minimize the amount of data to be transmitted [4].

In order to meet environmental challenges and mobility requirements, the European Union has developed a strategy to support the advance of sustainable transport systems, promoting intermodal transport instead unimodal transport. The objective is to contribute to real time traffic management, reducing delivery times and freight transport congestion [5].

Additionally, intermodal transport has many technical challenges about security and monitoring of goods. According to the Container

Tracking and Security Market 2012-2022 analysis [6], the necessity of ensure the security of the freight assets will see an exponential growth in the next six years. Therefore, detection of terrorists threats, freight thefts and intrusions, contra-band materials, explosives and biological weapon threats, added to the real-time monitoring and status and damage reporting of goods, will need innovative mechanisms. They will allow a secure and efficient transport, providing services that benefit all elements of the logistics chain: exporters, authorities, shipping companies, port operators, importers and customers.

Moreover, the design of a wireless system for tracking and monitoring of goods faces some additional challenges, such as the long life container tracking requirement, the need for a non-invasive inspection, and a harsh environment for wireless communication, such as scenarios based on stacked metallic containers.

This paper presents a complete system, experimentally tested, to improve tracking, security and management of goods in intermodal freight transportation. As it will be detailed in Section III, the proposed system is composed by the sensors inside the container, ultrasonic communication to extract information from the container, a wireless network and dedicated software to manage the information.

The paper is organized as follows. Section II presents a study of the state of art of systems for monitoring, management and tracking of goods, comparing advantages and drawbacks of different technologies, commercial products and research works. Section III describes an overview of the implemented system, detailing each part or subsystem in Section IV. Section V is dedicated to describe some implementation aspects. In Section VI, experimental results and validation in a real scenario are presented. Finally, the conclusions are drawn in Section VII.

II. RELATED WORKS

Intelligent transportation systems, with tracking and monitoring purposes, have been the subject of very active research in recent years.

About tracking functionalities, most of systems are based on RFID technology [7], [8] because of its cost and ease of deployment. However, there are some important drawbacks such as collision problems, which are increased for applications with many stacked containers. Moreover, RFID technology is not efficient for location purposes [9]. Besides, RFID is sensitive to electromagnetic propagation issues in harsh environment, such as stacked metallic containers. Finally, there is a possibility of activating explosives inside the containers by using RFID.

Another popular tracking technique is based on Optical Character Recognition (OCR) because of its low start-up, repair and maintenance cost. However, OCR is a more complex and error-prone process, due to some reasons as damaged characters, different container surfaces, manufacture-dependent font colors and shapes, and need for LOS (Line-Of-Sight) [10].

The idea of an intelligent container with multiple sensors connected by a wireless network is not new. In 2002, Liu *et al.* [11] demonstrated the need to automatize the containers terminals in order to reduce the costs and increase its efficiency. Likewise, Mahlke

Manuscript received February 17, 2017; revised July 6, 2017 and August 22, 2017; accepted August 24, 2017. Date of publication September 26, 2017; date of current version August 1, 2018. This work was supported in part by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Project TEC2013-47286-C3-1-R and in part by the Andalusian Regional Government under Project PI-1182/2013. The Associate Editor for this paper was S. C. Wong. (Corresponding author: José R. García Oya.)

The authors are with the Electronics Engineering Group, Electronics Department, University of Seville, 41092 Seville, Spain (e-mail: ehidalgo@us.es; jose.garciaoya@gie.esi.us.es; fmunoz@us.es; carvajal@us.es).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TITS.2017.2745717

1524-9050 © 2017 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.

See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

and Madani [3] propose a low power wireless sensor network at 2.4 GHz, with tracking and monitoring purposes. However, this work was only implemented at simulation level. Furthermore, like other published solutions, to transmit the collected information to outside the container, it is necessary to drill it.

Other research work with integrated tracking and monitoring of goods functionalities is [8], with door-opening sensors only working during loading/unloading process. Most recent works have been focused on optimizing location and tracking functionalities for roads [12], railways [13] and maritime and seaports [14] environments, by proposing novel logistics algorithms, but without being integrated in a complete solution for monitoring purposes.

If we consider commercial products instead of academic researches, there are several proprietary solutions for tracking of goods and monitoring applications:

- Globe Tracker, based on WiFi transmission, which monitors only motion variables [15].
- Triton, based on GPS/GPRS to provide the location and temperature [16].
- TREC, based on GSM and ZigBee with tracking purposes [17].
- WiFi Smart Chip Tags (WFSCT), providing real time container identification, temperature monitoring, and hazardous and explosive material detection [18].

In general, most of these systems have several common features:

- Tracking is partially based on Global Positioning System (GPS), increasing the power consumption, or via satellite, requiring a Subscriber Identity Module (SIM card) per container.
- Limited to only 2-3 sensors variables, generally, only temperature and doors state.
- Wireless band at 2.4 GHz, resulting in more communication problems for high density of containers, which is the usual situation for cargo freight applications.
- Invasive systems, due to the need to drill the container to read the sensor variables. Additionally, this wired communication means a higher complexity in the installation and maintenance processes.

In the following sections a novel solution will be proposed in order to improve the limitations of the current systems:

- Six different variables are monitored: acceleration, temperature, humidity, state of the door (open/close), luminosity and movement.
- Low power wireless network at 868/915 MHz for tracking and monitoring purposes is implemented.
- Ultrasound based communication through a metallic channel is implemented, avoiding drilling the container or squeezing a cable through the door seal, so that preserving the sealing of the container.

III. SYSTEM OVERVIEW

As discussed above, this paper proposes a complete-solution for tracking and monitoring of cargo containers and goods, avoiding damage to the containers. The integrated system is composed by five main parts, which can be identified in Figure 1.

1. Acquisition platform, composed by the sensor network and the sensor handler: collects the data inside the containers.
2. Non-invasive ultrasonic communication channel: transmits the information from inside to outside the container through its metallic wall.
3. Transponder controller: transmits the information from the ultrasonic receiver to the wireless network on a harsh environment.
4. Wireless network: transmits the information between the containers and the internet-gateway.

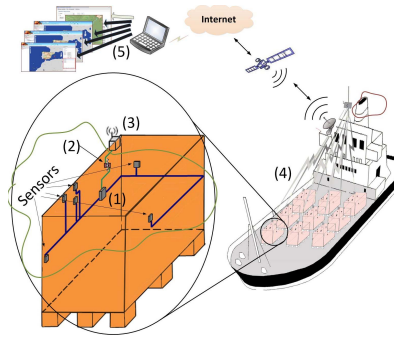


Fig. 1. System Overview.

5. A database and web server: receive the information of the cargo container in order to be presented to the final user. It will be used for tracking, monitoring and alarm reporting purposes. This subsystem will provide the service to the actors of the logistic chain.

The proposed system has to meet several requirements:

- Ranges of temperature ($-25/75$ °C) and humidity (0/100%) for terrestrial and maritime environments.
- Protection features: IP 67.
- Memory size and data codification so that all useful data of an entire trip is stored. This is necessary in case of loss of communication.
- Optimization of the available space reducing the size of the boards, cables and connectors.
- Very low power consumption.
- Easy installation: non-invasive communication and portable devices.
- Cost factor: design, manufacturing and maintenance costs must be irrelevant compared with the container and shipment costs.

In order to meet these requirements, the following decisions have been adopted:

- Selection of radio frequency: a wireless band feasible on harsh environments, with worldwide compatibility and high information bandwidth has been selected: 868/915 MHz (IEEE 802.15.4).
- Selection of ultrasound carrier frequency as low as possible (40 KHz) in order to reduce the attenuation through the metallic channel, avoiding multi-path effects and the use of complex equalization techniques.
- Selection of modulation scheme for the ultrasound communication: DBPSK (*Differential Binary Shift Keyed*) due its simplicity, robustness and no-coherent demodulation, reducing the complexity in the receiver side.
- Energy optimization:
 - To reduce costs, NiMH batteries powered a first prototype. However, at extreme temperatures, voltage output dropped. Thus, Lithium batteries were selected because they can stand better at lower temperatures.
 - Selection of the IEEE 802.15.4 standard, orientated to low power and efficient sensor networks.
- Security: need of key establishment, authentication, privacy and secure data aggregation by using the Authentication Encryption Standard AES 128.

IV. IMPLEMENTED SYSTEM

A. Acquisition Board

This module is installed inside the containers to monitor conditions of the traveling goods. It implements the interfaces with sensors, and performs data collection, local processing and temporary storage.

The acquisition board is made of:

1. A low power consumption 32bit-ARM Cortex-M3 central micro-processor STM32F103RD.

TABLE I
ACQUISITION BOARD: MICROPROCESSOR FEATURES

Current Supply Run Mode (All Peripherals Enabled)	37mA
Current Supply Standby	3uA
Clock	Up to 72MHz
DAC	2 x 12Bit
ADC	16 Channels x 12Bit
Flash	384 KB
RAM	64 KB
Interfaces	2 x I2C, 3 x SPI, 2 x I2S, CAN, 3 x USART, 2 x UART, 8 x Timers (16bit)

TABLE II
ACQUISITION BOARD: SENSORS FEATURES

	Current Supply	Accuracy	Range	Interface
C2D33	750uA	$\pm 2\%RH$, $\pm 0.3^\circ C$	0 to 100% RH, -40 to 125°C	I2C
MAX44000	5uA	0.03Lux	0-65535Lux	I2C
HGDEST021B	3uA	2mT	-	GPIO
EKMB1203111	2uA	-	12m	GPIO
LIS3DSHTR	11uA	0.06mg/LSB (FS $\pm 2g$)	$\pm 2g - \pm 16g$	I2C

2. A CC2D33 temperature and humidity sensor.
3. A MAX44000 brightness sensor.
4. A HGDEST021B magnetic sensor.
5. A EKMB1203111 motion sensor.
6. A LIS3DSHTR accelerometer.

By using these sensors, the system is able to monitor temperature, humidity and luminosity, and generate real time doors, motion, shocks and freefall alarms. The acquisition board is powered by 3.6V Lithium batteries. The main features of these components are detailed in Tables I and II.

Some of these sensor data (temperature, humidity and brightness) are collected periodically, while others are generated and collected by events, such as opening/closing doors, or movement of people inside the containers. Once the data are collected by the microprocessor, they are framed, modulated and transmitted by using the Digital-to-Analog Converter (DAC) of the microcontroller, as it will be detailed in the following section.

B. Ultrasonic Front-End

With the objective to preserve the sealing of the containers, an ultrasonic communication through the metallic walls is proposed. Researches in ultrasound communication are very popular in many industrial and military applications, where the structural integrity has to be preserved, and metallic walls compromise the effectiveness of wireless communication. For example, ultrasonic transmission can be used for communication trough hulls and bulkheads of naval vessels, chemical storage tanks, aircraft and spacecraft fuselages, hydraulic accumulators, or hermetically sealed pressure chambers [19]–[23]. However, ultrasonic communication will be limited for applications where foam isolation is required, such as reefer containers. Therefore, this issue will require further research in the future.

In order to generate the ultrasonic signal, piezoelectric technology has been selected over laser generation and electromagnetic acoustic transducers (EMAT) due its mayor maturity. Besides, it allows smaller sizes, power efficiency and cost reduction [24]. However, the main challenge associated with the acoustic techniques is the induced multipath effects, which can lead to Inters-Symbol Interference (ISI). This drawback will be minimized for this application by using a low resonance frequency.

The selected piezoelectric transducer is Prowave 400EP250, with a resonance frequency at 40 KHz. A so low carrier frequency has been used in order to minimize the attenuation and multipath effects, and because a high data rate is not required.

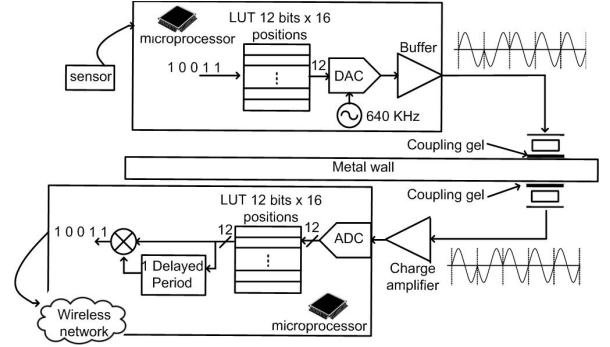


Fig. 2. Scheme of the Ultrasonic Communication.

The modulation scheme chosen to transmit the ultrasonic wave was DBPSK, which is typically used for low data bandwidth applications, because it allows a very simple non-coherent demodulator implemented by software.

The basic scheme is illustrated in Figure 2, where the transmitter is inside the container (top of the figure) and the receiver outside (bottom).

In the transmitter side, Fig. 2 shows how data from the different sensors are collected by the microprocessor. A *Look-up-table* (LUT) with a depth of 16 values and width of 12-bit stores the samples of a 40 KHz-sine wave. These samples are picked by the embedded 12-bit DAC at 640 kHz according to the sensors data to generate a DBPSK modulated signal.

Bit time has been adjusted to 16 cycles of the carrier frequency ($f_c = 40 \text{ kHz}$) in order to maximize the robustness in the reception. Therefore, the bit rate $F_b = 1/T_b$ is equal to 2.5 Kbps and the bit time $T_b = 16/f_c = 400 \mu s$. Experimentally, the measured 3-dB bandwidth of the transducer is around 10 KHz, higher than the 5 KHz required for this data rate.

The analog DBPSK signal generated is buffered and used as the input of the transducer. The transducer, placed on the metallic wall, is installed by using an acoustic coupling gel, whose function is to adapt acoustic impedance, maximizing the transmission of energy from one medium to another.

The received acoustic signal, outside the container (bottom of Fig. 2), is translated to an electrical signal by a faced transducer. Then, it is buffered and amplified by a high gain charge amplifier in order to obtain a full-scale signal at the Analog-to-Digital Converter (ADC).

The scheme of the charge amplifier is shown in Figure 3a. It is based on an operational amplifier with a negative feedback loop made of a capacitor (C_f) and a resistor (R_f). These elements implement a high pass filter with its cutoff frequency at $1/2\pi C_f R_f$, as illustrated in Figure 3b [25], where S_{VQ} is the sensitivity of this stage (inversely proportional to C_f). A value of 10 pF for C_f and a R_f higher than 400 K Ω have been selected in order to maximize the sensitivity and to place the signal band in the pass-band of the filter.

This ultrasonic front-end is installed as part of the transponder controller (described in Section IV.C), which will send the demodulated data to the wireless network.

C. Transponder Controller

The transponder controller, located outside the container, demodulates the ultrasonic signal, and sends the information to the hub or gateway of the wireless network. This board is controlled by another STM32F103RD microcontroller, which uses a 1Mb EEPROM Memory (24LC1025) to store temporary data. Each measurement has associated its data time stamp obtained by a real time clock (RTC).

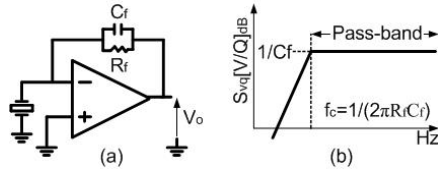


Fig. 3. Charge Amplifier Circuit (a) and Frequency Response (b).

TABLE III
IEEE 802.15.4. 868/915 MHz FEATURES

Range	10-1000m
Latency	<15ms
Data rate	Up to 20/40 Kbps (802.15.4-2003) Up to 250 Kbps (802.15.4-2006)
Channels	11
Addressing modes	64bit (up to 2^{64} devices)

D. Wireless Network

IEEE802.15.4 standard was selected to implement the wireless network, because it allows a low data rate communication with very low power consumption, extending the battery life. Other features of this standard are listed in Table III.

There are two physic layers available in ISM (Industrial, Scientific and Medical) band: 868/915 MHz and 2.4 GHz. The area covered by the wireless network grows when frequency decreases, mainly in hostile environment such as containers yard or ports. Therefore, the selected physic layer is 868/915 MHz band. As needed data rate is lower than 20 Kbps, the BPSK modulation scheme with 20 Kbps has been selected, compliant to IEEE 802.15.4-2003/2006.

The network is implemented by using the One-Go End Devices from the company Adevice Solutions. These end-devices communicate with the hub device in a tree topology wireless network. Hub device is the upper element of the wireless network, working as the gateway between the IEEE 802.15.4 network and the management platform, which receives the data by an internet connection. This internet connection can be Ethernet for fixed locations (ports, depots, . . .), mobile (GPRS/3G/4G) for land areas and Satellite for maritime spaces. Finally, the hub device, instead of each end-device, also provides the GPS position. Thus, although the location accuracy is slightly decreased, the total power consumption is enormously reduced.

E. SOS Server and Data Browser

This element stores received data and provides the management functionalities and the monitoring and tracking information to the end user. It is composed by two sub-systems: the SOS (Sensor Observation Service) Server and the Viewer.

The SOS Server is based on 52° North Geospatial Open Source Software and offers a standard user interface to work with the received measurements, including the SensorML standard in order to model the sensors data by using a XML format. The Viewer incorporates a SOS client in order to present the information stored in SOS Server (GPS Position, temperature, humidity . . .) and display it by using a web viewer (Fig. 4). This browser is composed by different layers, which can be activated or deactivated by the end user.

V. IMPLEMENTATION ASPECTS

Enclosures of acquisition board and transponder controller must fulfill two main requirements: ruggedization and miniaturization. A package (model B 140804 ABS 7035) was selected, with IP 66/IP 67 classification and dimensions of $150 \times 80 \times 40 \text{ mm}^3$. This size was chosen with the objective of fitting these devices in the corrugated surface of the containers, providing them an additional protection in a real implementation. Moreover, both packages have to be faced in order to implement the ultrasonic communication.



Fig. 4. Viewer Interface.



Fig. 5. Transponder controller outside the container (left) and acquisition board inside the container (right).

TABLE IV
COMPARISON BETWEEN DIFFERENT RELATED WORKS BASED ON ULTRASONIC TRANSMISSION

Publication	Data rate (Kbps)	Modulation	Voltage / Power Input	Bulkhead Thickness (cm)
[19]	0.435	AM	10 V	15.24
[20]	1	AM	30 mW	0.7
[21]	1000	QPSK	1230 mW	2.54
[22]	15000	OFDM	-	6.35
[23]	17370	OFDM	31 V	6.35
This work	5	DBPSK	3.3V/36.3 mW	1

Finally, a third ruggedized package (T 205 model, with dimensions of $52 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$) is used to allocate the temperature, humidity, motion and magnetic sensors. These three packages installed in the container are illustrated in Figure 5.

Another implementation aspect is a secure fixing of these enclosures over the metallic surface. With this objective, four BMN4-16 Neodymium magnets were selected, capable of supporting 9.5 Kg each one.

Finally, about the cost factor, the full-system has a scalable price, being 200-300€ per container. Thus, it is worth the investment, taking into account that the value of the load is typically between 10.000 and 40.000 Euros for fruits, and up to several million Euros for pharmaceutical products [4].

VI. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Ultrasonic System

Before the integration with the whole system, the metallic channel based on ultrasonic communication was separately tested by using the schemes of Figure 2 and 3a. The container wall was firstly emulated using a metallic barrier of $1 \times 1 \times 0.01 \text{ m}^3$, thicker than necessary (container walls thickness are around 5-7 mm). The charge amplifier has been implemented based on the operational amplifier OPA350 of Texas Instruments. Experimental results shows 12 mV_{pp} amplitude signal at the output of the transducer outside the container when a 3.3 V_{pp} (36.3 mW) is applied at the input of the inner transducer. The 3-dB bandwidth is 10 KHz, enough to meet the 2.5 Kbps data rate requirement detailed in Section IV.B.

With the objective to place the presented system into the state of the art, a comparative study of ultrasonic metallic transmission systems is drawn in Table IV, where only [21] uses EMAT instead

TABLE V
MEASUREMENT RESULTS

Test bench	Periodic Meas.	Correct Periodic Meas.	Meas. of events	Correct Meas. of events	Total Meas.	Correct Meas.
1	62	98.38%	20	100%	82	98.78%
2	67	98.51%	81	97.53%	148	97.97%
3	300	98%	973	97.12%	1273	97.33%

piezoelectric technologies. It is possible to observe how a higher data rate requirement means a more complex modulation process, such as OFDM [22], [23], when frequency-selective fading and multi-path propagation effects are introduced in the communication channel. Additionally, the high attenuation through the metallic channel for high frequencies results in relatively high power consumption, leading to very high input signal levels. Only [20] is a low power implementation, with a lower data rate for a thinner bulkhead than the proposed system.

Finally, in the final implementation of the proposed system, this power is only consumed during the transmission time, which is 108.8 ms (being periodically sent each 1 hour), due to the information frame has 34 bytes.

B. Experimental Results

As a previous step, sensors inside the container were satisfactorily tested. Temperature, brightness and humidity sensors were tested taking measures periodically each 1 hour during 4 days. Accelerometer, motion and magnetic sensors were validated being excited each 30 minutes approximately during 15 hours. The time-stamp of each measurement was validated as well.

The next step was to verify the correct performance of the transponder controller, checking the data received from the ultrasonic front-end, the communication with the wireless transceiver and the stored temporary data.

About the wireless network, the correct communication between the hub and the end devices, and the GPS position values, were validated. Additionally, the end device reconections were successfully implemented, obtaining a cover area of around 500 m, higher than the requirement (around 150 m) initially estimated.

Table V illustrates the reliability of the system, showing the final results obtained for three different test benches with three cargo containers monitored simultaneously.

Finally, in order to validate the *SOS Server and data browser* some tests were implemented with the objective to check the correct detection of the containers and their location in the map. A view of these functionalities was previously illustrated in Figure 4.

VII. CONCLUSIONS

In this paper, a feasible system for intermodal freight transport with electronic management and tracking of goods applications has been presented, describing each of its parts: an internal intelligent configurable sensor network, a non-invasive and low power through metal ultrasonic data communication, a long range and low power scalable wireless network IEEE 802.15.4 at 868/915 MHz for harsh environment applications, and a management subsystem for tracking, monitoring and alarm reporting purposes. The integrated system has been experimentally tested and means a competitive contribution to the intermodal freight transport regarding costs, worldwide compatibility and sealing preservation of the monitored cargo containers.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Dr. L. Onieva and Dr. P. Cortés for the technical support about logistic systems, and the companies Guadaltel and Adevice Solutions for the collaboration in the final implementation.

REFERENCES

- [1] R. K. Miler, "Electronic container tracking system as a cost-effective tool in intermodal and maritime transport management," *Econ. Alternatives*, vol. 6, no. 1, pp. 40–52, 2015.
- [2] P. Coto-Millán, M. A. Pesquera, and J. Castanedo, *Essays on Port Economics*. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [3] S. Mahlknecht and S. A. Madani, "On architecture of low power wireless sensor networks for container tracking and monitoring applications," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Ind. Inform.*, Jun. 2007, vol. 1, no. 1, pp. 353–358.
- [4] W. Lang, R. Jedermann, D. Mrugala, A. Jabbari, B. Krieg-Brückner, and K. Schill, "The 'intelligent container'—A cognitive sensor network for transport management," *IEEE Sensors J.*, vol. 11, no. 3, pp. 688–698, Mar. 2011.
- [5] European Commission, Brussels, Belgium. (2001). *White Paper. European Transport Policy for 2010: Time to Decide*. [Online]. Available: http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/b_en.html
- [6] *The Container Tracking and Security Market 2012–2022*, Visiongain, London, U.K., Aug. 2012.
- [7] S. J. Barro-Torres, T. M. Fernandez-Carames, M. Gonzalez-Lopez, and C. J. Escudero-Cascon, "Maritime freight container management system using RFID," in *Proc. 3rd Int. EURASIP Workshop RFID Technol.*, Sep. 2010, pp. 93–96.
- [8] S. J. Kim, G. Deng, S. K. S. Gupta, and M. Murphy-Hoye, "Intelligent networked containers for enhancing global supply chain security and enabling new commercial value," in *Proc. 3rd Int. Conf. Commun. Syst. Softw. Middlew. Workshops (COMSWARE)*, Jan. 2008, pp. 662–669.
- [9] S. Abbate, M. Avvenuti, P. Corsini, B. Panucci, M. Passacantando, and A. Vecchio, "An integer linear programming approach for radio-based localization of shipping containers in the presence of incomplete proximity information," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1404–1419, Sep. 2012.
- [10] T. C. Lim and M. S. Chiu, "A study of the SMART container monitoring system in the ocean shipping industry," in *Proc. IEE Seminar Signal Process. Solutions Homeland Secur.*, Jul. 2009, pp. 351–358.
- [11] C. I. Liu, H. Jula, and P. A. Ioannou, "Design, simulation, and evaluation of automated container terminals," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 12–26, Mar. 2002.
- [12] A. Abadi, P. A. Ioannou, and M. M. Dessouky, "Multimodal dynamic freight load balancing," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 356–366, Feb. 2016.
- [13] W. Sun, F. R. Yu, T. Tang, and B. Bu, "Energy-efficient communication-based train control systems with packet delay and loss," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 452–468, Feb. 2016.
- [14] X. Yang, W. Mi, X. Li, G. An, N. Zhao, and C. Mi, "A simulation study on the design of a novel automated container terminal," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 5, pp. 2889–2899, Oct. 2015.
- [15] (2016). *Globe Tracker*. Accessed: Jan. 31, 2017. [Online]. Available: <http://www.globetracker.com/>
- [16] (2017). *Triton K2*. Accessed: Jan. 31, 2017. [Online]. Available: <http://www.galooli.com/product/triton-k2/>
- [17] J. T. Yao, *Web-Based Support Systems*. London, U.K.: Springer, 2010.
- [18] (2006). *WiFi Wireless, Inc. Announces Their New 'Smartship' for Container Tracking*. Accessed: Jan. 31, 2017. [Online]. Available: <http://www.marketwired.com/press-release/wifi-wireless-inc-announces-their-new-smartship-for-container-tracking-684632.htm>
- [19] G. J. Saulnier *et al.*, "Through-wall communication of low-rate digital data using ultrasound," in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Oct. 2006, pp. 1385–1389.
- [20] M. Kluge, T. Becker, J. Schalk, and T. Otterpohl, "Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes," in *Proc. IEEE Sensors*, Oct. 2008, pp. 41–44.
- [21] D. J. Graham, J. A. Neasham, and B. S. Sharif, "Investigation of methods for data communication and power delivery through metals," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4972–4980, Oct. 2011.
- [22] K. Wanuga, M. Bielinski, R. Primerano, M. Kam, and K. R. Dandekar, "High-data-rate ultrasonic through-metal communication," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control*, vol. 59, no. 9, pp. 2051–2053, Sep. 2012.
- [23] T. J. Lawry, K. R. Wilt, J. D. Ashdown, H. A. Scarton, and G. J. Saulnier, "A high-performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control*, vol. 60, no. 1, pp. 194–205, Jan. 2013.
- [24] R. A. Primerano, "High bit-rate digital communication through metal channels," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Drexel Univ., Philadelphia, PA, USA, Jul. 2010.
- [25] A. Carlosena, A. López-Martín, and M. Massarotto, "Charge amplifiers," in *Encyclopedia of Sensors*. Valencia, CA, USA: Amer. Sci. Publishers, 2006, pp. 1–13.

“Subsampling OFDM-Based Ultrasonic Data Communication
Through Metallic Channels for Monitoring of Cargo
Containers”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation
Systems*, 2018

Subsampling OFDM-Based Ultrasonic Data Communication Through Metallic Channels for Monitoring of Cargo Containers

José R. García Oya¹, José M. Algueta Miguel¹, José García Doblado,
Fernando Muñoz Chavero, *Member, IEEE*, Eduardo Hidalgo Fort,
Vicente Baena Lecuyer, *Member, IEEE*, and
Antonio J. López Martín¹, *Senior Member, IEEE*

Abstract—An enhanced ultrasonic communication system based on piezoelectric transducers for monitoring of goods in cargo containers is presented. The proposed system consists of several sensors placed inside the container whose data are collected and transmitted outside of it. Data transmission is carried out by an ultrasonic communication channel in order to avoid drilling the wall of the container. The proposed data communication system is based on the transmission of a 128-OFDM signal. This modulation has been chosen due to its robustness to channels with frequency-selective fading and its spectrum efficiency. In order to increase the signal bandwidth and to reduce the power consumption at the internal node (transmitter), the proposed system exploits the non-linearity of the metallic channel to transmit at higher resonance frequencies. Moreover, power consumption at the external node (receiver) is reduced by using a subsampling-based receiver, which allows its implementation through low-cost electronics.

Index Terms—Intelligent containers, intermodal transport, metallic channels, OFDM, piezoelectric transducers, subsampling receivers, tracking, ultrasonic communication.

I. INTRODUCTION

Research in ultrasonic communication has grown in recent years, especially for applications where sealing and structural integrity must be preserved, such as aeronautics and aerospace industry, and hermetically sealed tanks and fuselages [1]–[6]. For these applications, a wired communication proves unfeasible and even the effectiveness of a wireless communication is reduced in these harsh environments.

The system proposed in this paper is particularly oriented to cargo containers, which need to implement a continuous non-invasive inspection in order to monitor and report the state of the assets. The implementation of an efficient cargo monitoring system is fundamental due to the high impact of the freight transport on the global economy [7], specially the maritime freight transport, which represents the 75% of international freight transportation [8]. Therefore, there is an ongoing trend to integrate Information and Communication Technologies (ICTs) with transportation systems [9].

The proposed system is based on placing several sensors inside the container, whose output data are collected by a microprocessor. This microprocessor transmits the information by an ultrasonic communication link through the metallic wall of the cargo container.

Outside the containers, information is transmitted by a wireless network to an internet-gateway to manage this tracking and monitoring information by the end users of the logistics chain. The goal would be to approach to the paradigm of intelligent containers [10]–[11], so that all the stakeholders of the intermodal freight transport are interconnected. Since freight transport usually combines multiple modes (such as water, roads, railways), the intermodal transport framework proposes to improve this transportation simultaneously over all these specific modalities, implementing collaborative processes to integrate the possible influences of the different modes on the others [9], [12]. The end result will be to reduce delivery times and congestion, in order to decrease the impact on the environment, by implementing sustainable intelligent containers performing decisions locally to minimize the amount of data to be transmitted.

In [6] an experimentally validated system with tracking, security and management of goods purposes was presented. The main advantage of this system over other commercial solutions was the avoidance of any damage on the container's surface by using a non-intrusive technology based on ultrasonic communication. This paper is focused on improving the design of the ultrasonic front end, performing a more exhaustive study of the metallic channel in order to exploit its non-linearity to transmit at higher resonance frequencies. This will improve such previous work in terms of robustness, data rate and power consumption, increasing the battery life. The improvements achieved directly impact on the tracking and monitoring capabilities of the proposed intermodal freight transportation system.

The paper is organized as follows. Section II summarizes several related works with applications in monitoring of cargo containers. Section III presents an overview of the whole system. Ultrasonic channel characterization is detailed in Section IV. From the obtained results, an enhanced ultrasonic front-end topology is proposed in Section V. Section VI describes the experimental results and Section VII presents a comparative study of similar research works. Finally, conclusions are drawn in Section VIII.

II. RELATED WORKS

The main concepts and benefits of automatizing the containers terminals were originally evaluated in [13]. By using the basis explored in [13], more recent research works have studied how to optimize the logistics algorithms to improve location, tracking and planning for roads [12], trains [14] and specially container seaports [15], [16] applications. This interest is due to the fact that these maritime terminals represent the main interface and iteration point between the different freight transportation modalities. However, all these approaches do not provide an integrated solution with monitoring of goods functionalities. Besides, there are several complete solutions at research [17] and commercial [18] levels. However, these solutions

Manuscript received February 19, 2018; revised August 29, 2018; accepted November 14, 2018. This work was supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Projects TEC2016-80396-C2-2-R and TEC2016-80396-C2-1-R. The Associate Editor for this paper was X. Cheng. (Corresponding author: José R. García Oya.)

J. R. García Oya, J. García Doblado, F. Muñoz Chavero, E. Hidalgo Fort, and V. Baena Lecuyer are with the Electronics Engineering Department, University of Seville, 41004 Seville, Spain (e-mail: jose.garciaoya@gie.esi.us.es).

J. M. Algueta Miguel and A. J. López Martín are with the Institute of Smart Cities, Public University of Navarra, 31006 Pamplona, Spain.

Digital Object Identifier 10.1109/TITS.2018.2882565

present some drawbacks, such as using wireless communication at 2.4 GHz (leading to communication issues due to the high density of stacked metal containers) and the use of invasive solutions, which need to drill the container surface to collect the sensed variables.

In order to overcome these limitations, [6] proposed, respectively, the use of both a low power wireless network at 868/915 MHz and ultrasonic communication through the container metallic walls. This solution was selected over other non-invasive technologies, such as RFID, which presents collision and electromagnetic propagation problems for harsh scenarios with many stacked containers, and also reduced efficiency for monitoring and location purposes [19]. Other discarded non-invasive solutions are based on Optical Character Recognition (OCR) [20] and computer vision-based techniques [21]. These techniques imply more complex and error-prone processes, due to the high dependence with the properties of the container surface, which can be deteriorated during the transport, and also with conditions such as angle of view, distance or luminosity.

Finally, a numerical comparison between other related works based on ultrasonic communication through metal barriers, for low data rate [1]–[3], [6] and high data rate applications [4], [5], will be detailed in Section V. More specifically, as mentioned above this paper presents an enhanced version of the previous work [6], focused on overcoming some limitations regarding power consumption, robustness and signal bandwidth. The main novelties of the proposed system regarding [6] can be summarized as follows:

a) Power consumption is reduced considerably by using a new transducer-metal coupling method more robust against fluctuations and with higher signal bandwidth and sensitivity, allowing reduction of the voltage generated at the input of the ultrasonic transducer at the transmitter side.

b) The proposed transmitter implementation exploits the non-linearity of the metallic channel, by transmitting a 5th harmonic over the operation frequency of the ultrasonic transducer. This innovative solution reduces the power consumption in the transmitter, which is a critical requirement for devices installed inside the container.

c) Power consumption is also reduced in the receiver side by implementing a subsampling based process for non-linear scenarios, which allows the use of low-cost electronics for higher data rates. Also, the employed carrier and sampling frequencies have been properly selected in order to avoid the use of a Direct Digital Synthesizer (DDS), reducing the complexity at the transmitter and receiver sides.

d) A more reliable modulation scheme (128-OFDM instead of DBPSK) is proposed in order to exploit the observed higher signal bandwidth. This multi-carrier modulation reduces the transmission times, improves robustness against fading effects and fluctuations of carrier frequency, and increases the spectrum efficiency. This latter advantage would allow higher data rates, extending the sensor capabilities. For example, by increasing the number of measurements, or including high data rate information, such as the case of transmission of images with alarm report purposes.

III. SYSTEM OVERVIEW

The proposed overall system is composed of:

- Sensors inside the container.
- Ultrasonic communication link to extract information from the sensor handler to the transponder controller, both based on low power microprocessors.
- A wireless network to transmit the information between the containers.

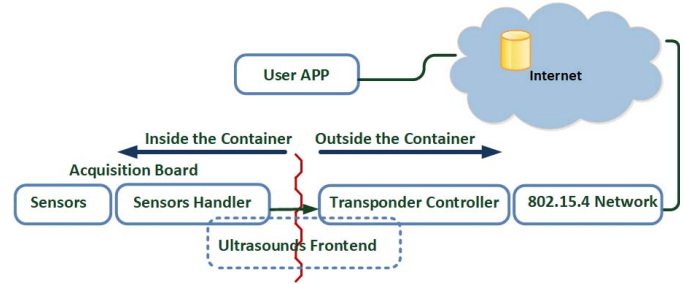


Fig. 1. System overview.

- The internet-gateway and dedicated software to manage the information. This information will be presented to the final user and it will be used for tracking and monitoring purposes.

The features and functionalities of each part were detailed in [6] and can be identified in Figure 1. The system, based on non-invasive communication and portable devices, has a reduced cost-factor of design, manufacturing and maintenance, having a scalable price of 200-300€ per container, almost irrelevant compared with the investment for a container and the associated shipment costs.

The system was designed to work properly on a harsh environment based on stacked metallic containers, by selecting the frequency band 868/915 MHz (IEEE 802.15.4 standard), with worldwide compatibility, high information bandwidth and oriented to low power and efficient sensor networks. The proposed solution optimizes signal bandwidth and power consumption, by redesigning the ultrasonic communication link, as will be described in the next sections.

IV. ULTRASONIC CHANNEL DESCRIPTION

A. Ultrasonic Technology Selection

Piezoelectric transducers have been selected over other technologies, such as laser and electromagnetic acoustic transducers (EMAT), due to their higher maturity, transducers size, power efficiency, lower maintenance costs and higher data rates [22]. The main drawback associated to the piezoelectric techniques is the induced multipath propagation, leading to Inter-Symbol Interference (ISI). This limitation will be minimized, using a multi-carrier OFDM modulation, by selecting a proper cyclic prefix, as described in Section V. This allows increasing the carrier frequency and exploiting the benefits of these modulations regarding spectrum efficiency. The employed piezoelectric transducer is the model Prowave 400EP250 model, with a carrier frequency at 40 KHz.

B. Transducer-Metal Coupling Selection

The performance of the ultrasonic channel depends to a large extent on the quality of the coupling between the metallic wall and the ultrasonic transducer. In the previous system proposed in [6], a magnetic enclosure was employed to attach the transducers to the container wall, allowing an easy and versatile installation. However, this type of coupling can reduce the stability of the channel with respect to the frequency response, due to a lower acoustic impedance matching caused by insufficient pressure or surface roughness.

Other coupling methods based on permanent adhesives have been widely used in the literature [3], providing higher physical resistance and improved stability of the ultrasonic channel, at the expense of a more tedious installation.

In this context, both coupling approaches, i.e., the magnetic enclosures employed in [6] and the fixation using an adhesive (Araldite 2011 Epoxy), have been experimentally compared. A painted steel

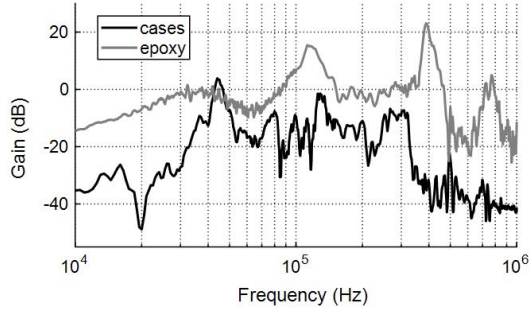


Fig. 2. Frequency response using epoxy and magnetic cases.

plate with an area of 1 m^2 and a thickness of 0.7 cm has been employed for emulating the properties of the real cargo container in this preliminary test, placing the aligned transducers at both sides of the plate.

The main conclusion was the strong dependence of the frequency response with the coupling method used. The experimental results are shown in Figure 2. As can be observed, the transducers fixed with epoxy clearly offer a higher sensitivity, except for a narrow band around the nominal operating frequency (40 KHz), where the system using magnetic cases presents its higher resonance peak. Moreover, it has been verified that the magnitude of this peak presents a slight variation (between 40-45 KHz) for different experiments. This drift is due to a reduction of acoustic impedance matching. In contrast, the transducers attached with epoxy offer a higher stability in a wide bandwidth, especially at higher frequencies, being the maximum sensitivity at around 360 KHz.

Additionally, note that the maximum of the transmitted ultrasonic wave is located at [2]:

$$N = (D^2 - \lambda^2) / 4\lambda \quad (1)$$

where D is the diameter of the transducer (25 mm) and $\lambda = v/f$ is the wavelength, with the acoustic propagation velocity $v \approx 5150 \text{ m/s}$ for steel and $f = 360 \text{ KHz}$. Thus, N results 0.735 cm , very similar to the metallic barrier thickness (0.7 cm), so the transmitter will work close to the optimal case. Therefore, the solution adopted to implement the final system will be based on epoxy coupling methods, instead of the magnetic cases used in [6], in order to exploit some features such as:

- A minimal frequency variation.
- High gain, up to 20 dB higher than working at the nominal resonance frequency using magnetic cases.
- Higher signal bandwidth (around 30 KHz) than working at the nominal resonance frequency (10 KHz) [6].

Although using low frequencies has some benefits regarding insertion losses and robustness against multi-path effects, the advantages found by transmitting around the 360 KHz band will lead to improve the overall performance of the communication system, as described in Section V.

V. COMMUNICATION SYSTEM BASED ON OFDM

A. Modulation Parameters and Employed Devices

An OFDM modulation is implemented in order to exploit the higher bandwidth observed in the channel and provide additional robustness to the communication link. The implemented OFDM modulation is a simplified version of the standard PRIME v1.3.6 (Power Line Intelligent Metering Evolution, standard developed by Power Line Communication).

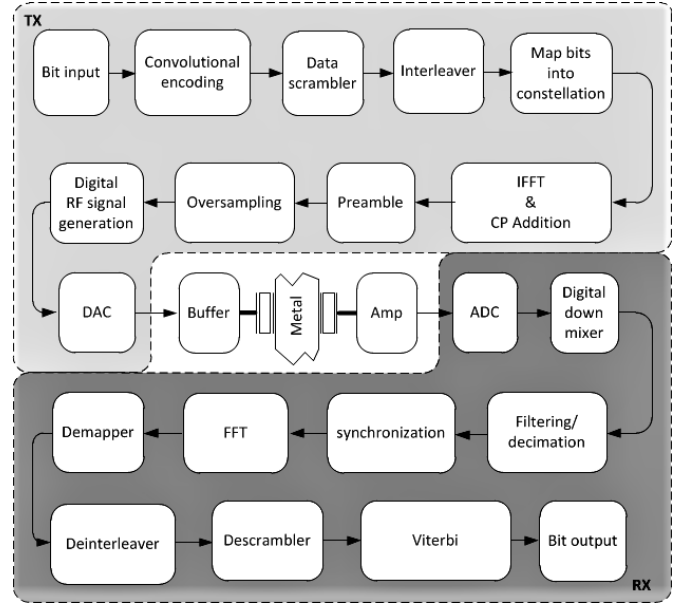


Fig. 3. Block diagram of the OFDM system.

The main modulation parameters are the following:

- 128 carriers (97 active carriers).
- Possible modulations: DBPSK, DQPSK and D8PSK.
- Optional convolutional FEC.
- Cyclic prefix of 16 samples.
- Preamble for detection and synchronization purposes based on a chirp of 40 samples.
- Signal bandwidth of 24.5 kHz.
- Separation between the carriers of 250 Hz.

In order to reduce the power consumption, modulation and demodulation processes are implemented by software using two low-cost microcontrollers 32bit-ARM Cortex-M3 STM32F103RD. With the same objective, the 12-bit DAC and ADC embedded in the microcontroller have been employed.

B. Transmitter Implementation

A diagram of the implemented OFDM system is shown in Figure 3. The transmitter (TX) encodes a binary data stream to generate discrete-time OFDM symbols, using a convolutional FEC (Forward Error Correction) with code generator polynomials equal to 1111001 and 1011011. This FEC can be disabled in order to increase the overall bitrate. After coding, the binary stream is randomized by the scrambler block, reducing the crest factor when there is a long stream of '0's or '1's. Due to frequency fading, OFDM subcarriers are usually received with different amplitudes and, therefore, some groups of subcarriers can be less reliable than others, causing more bit errors in bursts if they are not randomly scattered. Moreover, the interleaver permutes the order of bits to ensure that originally adjacent bits are separated by several bits.

After the interleaving process, the binary data is modulated as a multi-carrier DPSK signal with a pilot and 128 data subcarriers allowing the transmission of 128, 256 or 512 bits per symbol. The frequency domain OFDM symbol is converted to time domain by means of an IFFT process and the cyclic prefix is added to cancel the multipath effect. In order to carry out the synchronization process at the receiver side, a preamble is added at the beginning of the transmission frame. After that, the signal is up-converted to 72 KHz and then converted to the analog domain by using a 12-bit DAC.

This carrier frequency (f_{c1}) of 72 KHz has been selected with the objective to generate the signal directly, without using an external quadrature mixer, thus reducing costs. Thus, we select a DAC sampling frequency (f_{s1}) of 288 KHz, i.e., $f_{s1} = 4 \cdot f_{c1}$. This frequency plan allows the immediate implementation of a digital mixer, without implementing a DDS, i.e., only using values of ± 1 and 0 for the mixing process. Moreover, by selecting this value of f_{c1} , it is possible to exploit the high non-linearity of the channel to transmit a signal located at 360 KHz, using the 5th harmonic of the generated signal. This solution allows to transmit within the band of highest gain for the case of epoxy attachment (Figure 2), maintaining the use of a low cost DAC embedded in the microcontroller. Finally, a buffer is employed to drive the ultrasonic transducer.

C. Receiver Implementation

1) *Charge Amplifier Stage*: This stage performs the charge-voltage conversion of the ultrasonic signal, as was described in [6], and it is based on an operational amplifier (OPA350 of Texas Instruments) with a negative feedback loop composed by a capacitor (C_f) and a resistor (R_f), leading to a 1st-order high pass response, with a cutoff frequency at $1/(2\pi C_f R_f)$ and a sensitivity inversely proportional to C_f . A value of 10 pF for C_f and a R_f higher than 50 K Ω have been selected in order to maximize the sensitivity and to place the band of interest (i.e., a signal centered at 360 KHz with 24.5 KHz of signal bandwidth) in the pass-band of the amplifier.

2) *Analog-to-Digital Conversion Stage*: For this application we propose to implement a subsampling based receiver, in order to reduce the power consumption at the external node and to implement a detection process portable to lower cost ADCs. For a bandpass signal centered at f_c with a signal bandwidth B , the subsampling frequency (f_s) has to meet Equation 2 [23], in order to avoid aliasing between the replicas folded in the spectrum:

$$2(f_c - B/2)/(m - 1) > f_s > 2(f_c + B/2)/m \quad (2)$$

where m is the number of replicas of the signal in the range $[0, f_c - B/2]$, with a value between 1 and $\text{floor}((f_c + B/2)/B)$. Additionally, for a nonlinear environment, as the described ultrasonic metal channel, there are additional challenges to avoid aliasing between the different harmonics. For these scenarios, the selected sampling frequency has to meet this additional requirement [24]:

$$if_c + n_k f_s \leq if_c + (n_k + 1) f_s \quad (3)$$

where if_c and jf_c are two harmonics of f_c and $n_k = \text{floor}((jf_c - if_c)/f_s)$. Since this implementation is a particular case, working with the 5th harmonic as signal of interest (f_c), we assign to i and j values multiples of 1/5 instead of integer values, avoiding aliasing between the 5th harmonic and the original signal at 72 KHz and its 2nd-4th and 6th harmonics. A 6th order non-linearity has been assumed since the channel response attenuates around 40 dB the >6th order harmonics, as shown in Figure 2.

Between the valid sampling ranges given by (2)-(3), sampling frequency (f_{s2}) of 320 KHz is selected, so that f_{c1} (at 360 KHz) is folded to 40 KHz (f_{c2}). Therefore, the digital mixing process is implemented by ADC sampling, reducing the used resources. Since the sampling frequency is $f_{s2} = 8 \cdot f_{c2}$, it is not necessary to use a DDS, due the samples of the discrete sine and cosine only require the values of ± 1 , $\pm 1/\sqrt{2}$ and 0.

3) *Digital Domain Stage*: In the digital domain the signal is down-converted, filtered and decimated, as illustrated in Figure 3, in order to obtain the baseband complex OFDM symbols. Time synchronization is carried out using a simple correlation with the received signal and the preamble. Next, the cyclic prefix, which can be corrupted by the



Fig. 4. Transponder controller outside the container (left) and acquisition board inside the container (right).

TABLE I
BIT ERROR RATE FOR THE DIFFERENT SCENARIOS

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	0 ¹	0	0	0	0.00007
DQPSK	0	0	0	0.00024	0.0149
D8PSK	0	0.0003	0.003	0.02040	0.0718
DBPSK+FEC	0	0	0	0	0
DQPSK+FEC	0	0	0	0	0
D8PSK+FEC	0	0	0	0.00039	0.00079

¹ "BER=0" strictly equals to BER < 2·10⁻⁵ (in order to implement more reliable measurements, the error condition is given by receiving at least 10 wrong bits, i.e., the resolution is 10 errors/(2000 data bursts · 33 bytes · 8 bits)).

TABLE II
NORMALIZED ENERGY CONSUMPTION [μ J]
FOR THE DIFFERENT SCENARIOS

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	36.875	9.21875	2.124	0.72275	0.236
DQPSK	25.625	6.40625	1.476	0.50225	0.164
D8PSK	14.375	3.59375	0.828	0.28175	0.092
DBPSK+FEC	70.625	17.65625	4.068	1.38425	0.452
DQPSK+FEC	36.875	9.21875	2.124	0.72275	0.236
D8PSK+FEC	25.625	6.40625	1.476	0.50225	0.164

multipath echoing, is removed. Each time-domain OFDM symbol is processed by the FFT block, recovering the magnitude and phase of each OFDM subcarrier. Then, the data carriers are demapped, deinterleaved and descrambled, and finally decoded using a Viterbi decoder.

VI. EXPERIMENTAL RESULTS

For this test, the transducers were fixed to the metallic wall, faced at both sides of the cargo container (with a thickness of 7 mm and dimensions according to the International Standards Organization (ISO) [19]), as illustrated in Figure 4.

With the objective to decide the optimal modulation in terms of BER and energy efficiency, a comparison between three modulations, with five different voltage levels at the DAC output, and with or without using a FEC, is presented. For each experimental measurement, 2000 data bursts, with length of 33 bytes, are transmitted. The results are shown in Table I, where it is possible to observe the expected performance, i.e., a higher robustness when a FEC and a higher input voltage are employed. However, even for a minimal input voltage, the obtained BER results satisfactory.

Additionally, the energy consumption has been evaluated for the same 30 scenarios. These results are presented in Table II, showing the energy consumed by data burst (33 bytes), assuming a normalized resistance of 1 Ω . The transmission time can be expressed as:

$$T_{tx} = (N_{pr} + (N_{cp} + N_{ifft})N_{sym})/f_{bb} \quad (4)$$

where N_{pr} , N_{cp} , N_{ifft} are, respectively, the number of samples per preamble (40), per cyclic prefix (16) and per symbol (128), N_{sym}

TABLE III
EVM FOR THE DIFFERENT SCENARIOS

	50 mV _{rms}	25 mV _{rms}	12 mV _{rms}	7 mV _{rms}	4 mV _{rms}
DBPSK	19.8	18.86	16.51	12.56	7.78
DQPSK	19.24	18.63	16.12	12.25	7.49
D8PSK	19.42	18.68	16.14	12.29	8.83
DBPSK+FEC	19.16	18.38	16.24	12.3	7.64
DQPSK+FEC	18.95	18.29	16.27	12.31	7.82
D8PSK+FEC	19.15	18.5	16.24	12.42	8.78

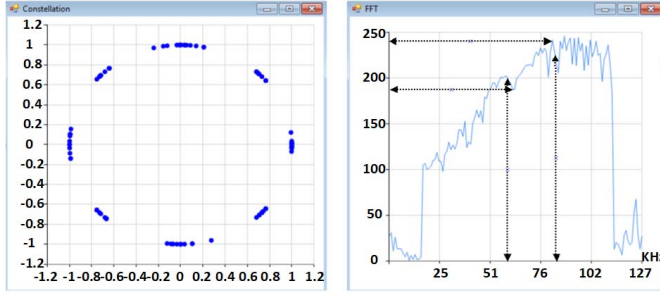


Fig. 5. Constellation (left) and channel response (right) for a D8PSK.

the number of symbols necessary to transmit 33 bytes for each modulation, and f_{bb} the baseband sampling frequency (32 KHz).

Moreover, EVM (Error Vector Magnitude) has been calculated and is shown in Table III. This figure of merit, which is independent of modulation, measures how far the constellation points are from the ideal locations, and is mathematically given by (5) [25]:

$$EVM = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{k=2}^{65} |r_k^i - r_{k-1}^i e^{-(j2\pi/M)\Delta b_{k-1}}|^2}{\sum_{i=1}^L \sum_{k=2}^{65} |r_k^i|^2} \quad (5)$$

where L is the number of OFDM symbols, r_k^i denotes the k^{th} carrier of the FFT output for symbol i . Δb_k represents the decision on the received information symbol coded in phase increment, and M is the number of constellation symbols, i.e., 2, 4, or 8 for DBPSK, DQPSK or D8PSK, respectively.

From this analysis, it is possible to observe how the optimal modulation in terms of accuracy results on a D8PSK (at 50 mV_{rms}), since it minimizes the consumed energy between scenarios with minimum BER and maximum EVM. For cases where the energy consumption is the main requirement, the best option correspond to a DQPSK with the activated FEC (at 4 mV_{rms}), considering the scenarios with minimal BER.

Figure 5 (left) illustrates the constellation measured for a D8PSK, where it is possible to observe how the locations between the eight regions are sufficiently separated. Figure 5 (right) shows the 256 points-FFT of the channel response. It is possible to observe how, for the band of interest (59.75-84.25 KHz), is very close to the maximum gain region, with a gain ripple of 58 points, i.e., 1.16 dB.

VII. COMPARATIVE ANALYSIS

A comparative study of ultrasonic systems through metal walls is shown in Table IV, which includes the features of the proposed system and the previous version presented in [6].

In this table, only [4] uses EMAT instead of piezoelectric technologies, presenting a lower power efficiency, typical of EMAT technologies. Additionally, although [4], [5] provides a high data rate performance, they also present higher power consumption since the attenuation through the metal channel increases with the frequency. This higher power consumption is also due to they use thicker metallic barriers, as the case presented in [1]. For low power applications,

TABLE IV
COMPARISON BETWEEN DIFFERENT RELATED WORKS
BASED ON ULTRASONIC TRANSMISSION

Publication	Data rate (Kbps)	Modulation	Voltage / Power Input	Bulkhead Thickness (cm)
[1]	0.435	AM	10 V	15.24
[2]	1	AM	30 mW	0.7
[3]	32.5	AM	100 mW	5.7
[4]	1000	QPSK	1230 mW	2.54
[5]	17370	OFDM	31 V	6.35
[6]	2.5	DBPSK	3.3V/36.3 mW	1
This work	50.6	OFDM	141.1 mV/66.7 μ W	0.7

such as [2], [3], the proposed system considerably improves the power consumption and the data rate, by using an OFDM instead of an AM modulation, leading to enhanced features regarding transmission times and spectrum efficiency.

Furthermore, it is possible to observe how the proposed system significantly improves the previous version [6]. Firstly, by using the resonance band at 360 KHz, it is possible to increase the signal bandwidth up to 24.5 KHz, which leads to a higher data rate (50.6 Kbps) and a lower transmission time. This time per data burst is minimum (5.75 ms from equation (4)) for the D8PSK case and maximum (28.25 ms) for the DBPSK+FEC, in contrast with the transmission time of 108.8 ms obtained in [6]. Secondly, the proposed system considerably reduces the power consumption (calculated for a 300 Ω -transducer input impedance), by exploiting the gain in the selected band, which is around 20 dB higher than the gain at 40 KHz by using magnetic cases. This power consumption is given for the scenario with higher EVM (input voltage of 50 mV_{rms}), being still possible to reduce this voltage keeping a good performance in terms of BER. Besides exploiting a higher gain, it is possible to reduce this input voltage since the proposed system presents an enhanced robustness against frequency drift and fading effects, by using an epoxy based coupling method and a multi-carrier modulation, respectively.

This enhanced robustness can also be evidenced by inspecting the reliability of the whole system. Once the performance of the sensors inside the container (i.e., temperature, brightness, humidity, accelerometer, motion and magnetic), the wireless network, the GPS and the server and data browser were validated as described in [6], the integrated system led to a 99.47 % of correct measurements, improving the 97.33 % value obtained in [6] for the same number of measurements and three cargo containers monitored simultaneously.

VIII. CONCLUSIONS

A low-cost and non-invasive ultrasonic communication based system has been presented for tracking, monitoring and management of cargo containers, where the sealing preservation and the reduction of the power consumption are the main technical challenges. The proposed system employs an OFDM modulation with the objective to increase the data rate and reduce the transmission times. The system uses an epoxy based coupling method in order to improve the robustness against drift of the carrier frequency and to transmit over the nominal frequency of the piezoelectric transducer, increasing the signal bandwidth and the gain at the selected band. As main novelty, we propose to exploit this higher gain and the non-linearity of the channel, transmitting the 5th harmonic of the generated signal, making it possible to reduce the power consumption at the internal node. At the receiver side, a subsampling based system allows to reduce power consumption of the external node. Thanks to the subsampling process, the proposed communication system can be implemented using low-cost and low power electronics. A comparison of different angular modulation has been performed in terms

of BER and consumed energy. The designed communication system has been integrated in the whole system, composed of an internal configurable sensor network, a long range and low power scalable wireless IEEE 802.15.4 network at 868/915 MHz, with worldwide compatibility and oriented to harsh scenarios, and a management subsystem for tracking and monitoring purposes. The integrated system has been experimentally validated in a real scenario, leading to a competitive solution for intermodal freight transport, and improving the features of the previous work regarding power consumption, data rate and robustness.

REFERENCES

- [1] G. J. Saulnier *et al.*, "Through-wall communication of low-rate digital data using ultrasound," in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Oct. 2006, pp. 1385–1389.
- [2] M. Kluge, T. Becker, J. Schalk, and T. Otterpohl, "Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes," in *Proc. IEEE SENSORS*, Oct. 2008, pp. 41–44.
- [3] J. D. Ashdown *et al.*, "A full-duplex ultrasonic through-wall communication and power delivery system," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 60, no. 3, pp. 587–595, Mar. 2013.
- [4] D. J. Graham, J. A. Neasham, and B. S. Sharif, "Investigation of methods for data communication and power delivery through metals," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4972–4980, Oct. 2011.
- [5] T. J. Lawry, K. R. Wilt, J. D. Ashdown, H. A. Scarton, and G. J. Saulnier, "A high-performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, vol. 60, no. 1, pp. 194–205, Jan. 2013.
- [6] E. H. Fort, J. R. G. Oya, F. M. Chavero, and R. G. Carvajal, "Intelligent containers based on a low-power sensor network and a non-invasive acquisition system for management and tracking of goods," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 8, pp. 2734–2738, Aug. 2018.
- [7] F. Corman *et al.*, "Optimizing hybrid operations at large-scale automated container terminals," in *Proc. Int. Conf. Models Technol. Intell. Transp. Syst. (MT-ITS)*, Jun. 2015, pp. 514–521.
- [8] E. Bou-Harb, E. I. Kaiser, and M. Austin, "On the impact of empirical attack models targeting marine transportation," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Models Technol. Intell. Transp. Syst. (MT-ITS)*, Jun. 2017, pp. 200–205.
- [9] G. Cavone, M. Dotoli, and C. Seatzu, "A survey on Petri net models for freight logistics and transportation systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 6, pp. 1795–1813, Jun. 2018.
- [10] W. Lang, R. Jedermann, D. Mrugala, A. Jabbari, B. Krieg-Brückner, and K. Schill, "The "intelligent container"—A cognitive sensor network for transport management," *IEEE Sensors J.*, vol. 11, no. 3, pp. 688–698, Mar. 2011.
- [11] R. Jedermann, T. Pötsch, and C. Lloyd, "Communication techniques and challenges for wireless food quality monitoring," *Philos. Trans. Roy. Soc. A*, vol. 372, no. 2017, p. 20130304, 2014.
- [12] A. Abadi, P. A. Ioannou, and M. M. Dessouky, "Multimodal dynamic freight load balancing," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 356–366, Feb. 2016.
- [13] C.-I. Liu, H. Julia, and P. A. Ioannou, "Design, simulation, and evaluation of automated container terminals," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 12–26, Mar. 2002.
- [14] W. Sun, F. R. Yu, T. Tang, and B. Bu, "Energy-efficient communication-based train control systems with packet delay and loss," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 452–468, Feb. 2016.
- [15] C. Caballini, C. Pasquale, S. Saccone, and S. Siri, "An event-triggered receding-horizon scheme for planning rail operations in maritime terminals," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 365–375, Feb. 2014.
- [16] L. Chen *et al.*, "Container port performance measurement and comparison leveraging ship GPS traces and maritime open data," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 1227–1242, May 2016.
- [17] S. Mahlknecht and S. A. Madani, "On architecture of low power wireless sensor networks for container tracking and monitoring applications," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Ind. Inform.*, vol. 1, no. 1, Jun. 2007, pp. 353–358.
- [18] (2018). *Globe Tracker*. Accessed: Jan. 31, 2018. [Online]. Available: <http://www.globetracker.com/gt-sense-genset/>
- [19] S. Abbate, M. Avvenuti, P. Corsini, B. Panucci, M. Passacantando, and A. Vecchio, "An integer linear programming approach for radio-based localization of shipping containers in the presence of incomplete proximity information," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1404–1419, Sep. 2012.
- [20] O. Bulan, V. Kozitsky, P. Ramesh, and M. Shreve, "Segmentation- and annotation-free license plate recognition with deep localization and failure identification," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, no. 9, pp. 2351–2363, Sep. 2017.
- [21] X. Sun, J. Ding, G. D. Chiara, L. Cheah, and N.-M. Cheung, "A generic framework for monitoring local freight traffic movements using computer vision-based techniques," in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Models Technol. Intell. Transp. Syst. (MT-ITS)*, Jun. 2017, pp. 63–68.
- [22] R. A. Primerano, "High bit-rate digital communication through metal channels," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Drexel Univ., Philadelphia, PA, USA, Jul. 2010.
- [23] R. G. Vaughan, N. L. Scott, and D. R. White, "The theory of bandpass sampling," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 39, no. 9, pp. 1973–1984, Sep. 1991.
- [24] J. R. G. Oya, A. Kwan, F. M. Ghannouchi, S. A. Bassam, and F. M. Chavero, "Design of dual-band multistandard subsampling receivers for optimal SNDR in nonlinear and interfering environments," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 4, pp. 981–983, Apr. 2014.
- [25] *Narrowband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Power Line Communication Transceivers for PRIME Networks*, document ITU-T Rec.9904, Oct. 2012.

“Low-Power Ultrasonic Front-End for Cargo Container Monitoring”. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019

Low-Power Ultrasonic Front-End for Cargo Container Monitoring

J. M. Algueta-Miguel, J. R. Garcia-Oya, A. J. Lopez-Martin, *Senior Member, IEEE*, C. A. De La Cruz Blas, *Member, IEEE*, F. Muñoz Chavero, *Member, IEEE* and E. Hidalgo-Fort

Abstract— A low-power ultrasonic communication front-end conceived for cargo container monitoring is presented. Two piezoelectric transducers operating at 40 kHz are fixed to the metallic wall by means of a customized magnetic case, allowing a non-invasive inside-outside communication preserving the container integrity. Once the resulting ultrasonic channel is characterized, an experimental measurement setup based on FPGA is implemented for testing some basic modulation and detection schemes in terms of Bit Error Rate (BER), also considering their robustness against undesired mechanical and electromagnetic perturbations. On this basis, a compact digital DBPSK modulator using a square carrier signal is proposed. Frequency and amplitude tracking algorithms are designed for optimizing the quality and robustness of the data transmission. Finally, a low-power low-rate (up to few kbps) architecture based on the previous elements is presented. All the proposed contributions are experimentally validated.

Index Terms — Data acquisition, cargo-container monitoring, ultrasonics, ultrasonic front-end, through-metal communication, BER measurement, piezoelectric transducers, charge amplifier.

I. INTRODUCTION

THE vertiginous growth of worldwide freight transportation over the last two decades has motivated an intensive research in smart monitoring of cargo containers, aimed at improving efficiency, safety, security and sustainability [1-4]. Commonly, the internal data of the container are acquired by a sensor network [5] and, once outside the container, this information is transmitted through a wireless network for subsequent processing [6, 7]. In this context, this work is focused on the inside-outside interface that delivers the internal data to the external wireless node through the container wall. Several non-invasive methods have been employed for wireless through-metal communication [8-10]. From an electromagnetic viewpoint, inductive coupling [9, 11, 12] and near-field devices [13] have been used for transmitting energy through metal walls, but

their low efficiency makes them unsuitable for data transmission. In this scenario, ultrasonic acoustic waves are considered the most efficient choice for data and/or power transfer through metallic barriers.

Electromagnetic-acoustic transducers (EMATs) [9, 14] and piezoelectric transducers (PTs) [15-26] are the most popular devices for this approach. The strength of EMATs lies in their capability of non-contact operation. However, PTs are the most popular choice due to their higher efficiency, in spite of requiring an accurate coupling [16].

Typically, thick metal barriers have to be overcome and/or a high-rate highly robust transmission is aimed, so multi-carrier data multiplexing becomes a very common approach. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is by far the most common choice [17-20], usually including empirical equalization schemes based on feedback algorithms. However, previous works addressing in depth low-power through-wall ultrasonic communication in general [22] and regarding cargo container monitoring in particular, are only marginally covered in the literature [24, 25].

In this context, a versatile non-invasive ultrasonic front-end for data transmission through the container wall is presented in this work. It follows a low-cost, low-rate and low-power approach, clearly improving the transmission power requirements of any of the related proposals [22, 24, 25].

A reversible and non-invasive placement system of PTs is presented in Section II. It is based on a magnetic case specifically designed for this application, both safeguarding the integrity of the container and facilitating the transducer installation. The channel characterization using this transducer fixation method is performed. Moreover, several modulation schemes defined in Section III have been tested in terms of Bit Error Rate (BER) in Section IV. A FGPA-based measurement system [27] has been designed for this purpose. Also, electrical and mechanical perturbations have been applied for evaluating the robustness of the different modulations, which has not been previously reported in the literature to the best of the authors' knowledge.

On this basis, a novel Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) modulator based on a digitally-generated square carrier signal is proposed in Section V. In order to optimize the quality and robustness of the data transmission, frequency and tracking algorithms are presented in Section VI. A pseudo-differential charge amplifier [28] providing sensitivity programmability is employed for signal conditioning. A final architecture based on the previous contributions is implemented under simplicity and low-power criteria in Section VII, since a low data rate (of one or few

This work was supported in part by Spanish Agencia Estatal de Investigación and Fondo Europeo de Desarrollo Regional under Grant TEC2016-80396-C2-1-R, and in part by the Obra Social La Caixa, Fundación Caja Navarra (Convocatoria 2018 de Captación de Talento).

J. M. Algueta-Miguel, A. J. López-Martín and C. A. De la Cruz Blas are with the Smart Cities Institute, Public University of Navarra, Pamplona, E-31006 Spain (e-mail: {josemaria.algueta, antonio.lopez, carlos.aristoteles}@unavarra.es)

J. R. García-Oya, F. Muñoz Chavero and E. Hidalgo-Fort are with the Electronic Engineering Department, University of Seville, Sevilla, E-41092 Spain (e-mail: jose.garciaoya@gie.esi.us.es, {fmunoz, ehidalgo}@us.es)

kbps) clearly fulfills the requirements for container monitoring [25]. Finally, a brief conclusion is drawn in Section VIII.

II. ULTRASONIC TRANSDUCER AND CHANNEL CHARACTERIZATION

According to the International Standards Organization (ISO), dimensions of shipping containers are 2.44 m (8 ft and 6 in) wide by 6.10 or 12.20 m (20 or 40 ft) long and 2.59 m (8 ft and 6 in) high. The walls are typically made of trapezoidal corrugated steel sheets, with a thickness of 1.8 or 2 mm. The exact size of the trapezoidal profile can vary according to the type of container and the installation place (long or front side). In order to model the container wall, a galvanized steel plate of 50 cm x 50 cm and 2 mm thickness was chosen for the laboratory tests. A layer of plastic paint was applied for a closer approximation to the real scenario.

A. Ultrasonic Transducer Selection

Concerning the ultrasonic piezoelectric transducer, the Prowave 400EP250 was chosen among several models due to its good tradeoff between sensitivity and cost. This device has a diameter of 25 mm and a nominal operation frequency of 40 kHz, which is clearly affordable for a low-rate communication. Furthermore, multipath due to diffraction effects on the transducer boundary can be minimized operating in the so called far field region [12], in which the resulting acoustic wave is approximately planar for wall thicknesses larger than $d^2/4\lambda$, where d is the PT diameter and λ is the wavelength of the acoustic signal. In this application, the previous condition is fulfilled by the chosen transducer at operation frequencies lower than 65 kHz.

B. Ultrasonic Transducer Installation

High-strength high-toughness adhesive is often used for permanently fixing PTs to metal structures [16-18, 20, 22] yielding good coupling properties and excellent physical resistance. Nevertheless, permanent adhesives require a drying time and both transducer and container can be damaged if they have to be separated. Moreover, aging deteriorates the adhesion performance. By contrast, a removable fixing is more versatile, allowing a quick and easy installation and preserving the integrity of both elements. However, the establishment of a robust communication becomes a challenging task in this latter case: the insufficient and irregular transducer-wall pressure as well as the deficient support due to the surface roughness, are typical harmful effects associated to a reversible fixing approach. A system based on magnetic enclosures was used in [25] for containing the whole communication system (PT transmitter/receiver modules) and protecting it from adverse environmental conditions, but the coupling quality between the transducer and the container wall was not a major concern.

In this context, the magnetic case design shown in Fig. 1 is proposed for optimizing the through-wall signal transmission. It consists of two plastic pieces fabricated with a 3-D printer. The 400EP250 transducer is fitted in one of them, which in turn includes 8 threaded and equally-spaced neodymium magnets around to hold the case on the steel wall, also producing a homogenous pressure on the PT. The second piece is a cover which is fixed to the magnets by means of

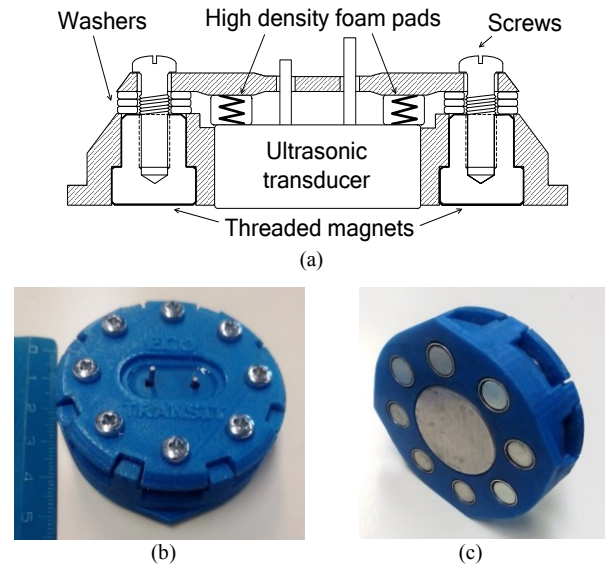


Fig. 1. Fabricated magnetic case adapted to ultrasonic transducer 400EP250 (a) Scheme (b) Upper side photograph (c) Bottom side photograph.

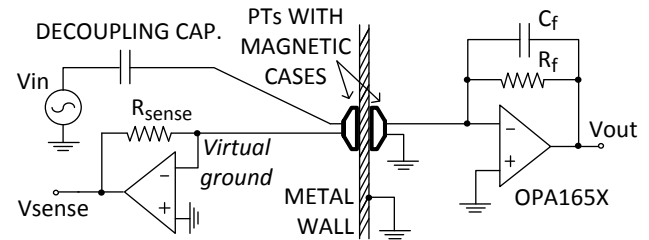


Fig. 2. Set-up for experimental characterization of ultrasonic channel.

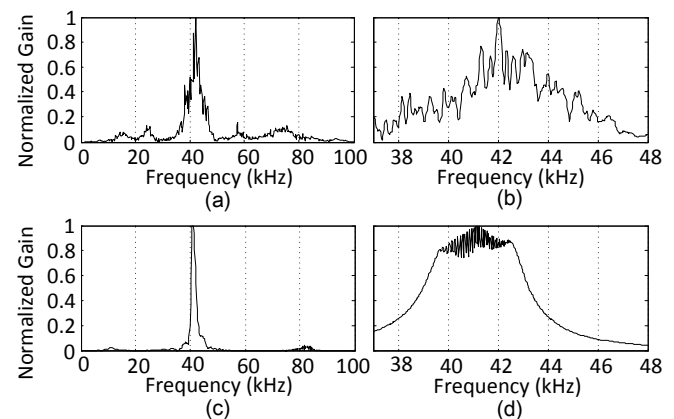


Fig. 3. Normalized frequency response of the ultrasonic channel: (a) Transducers attached using the magnetic cases (b) Detail of the frequency range of interest of (a) (c) Directly placing both transducers back to back, only for comparison. (d) Detail of the freq. range of interest of (c).

screws, thus allowing them to graduate the prominence of the transducer over the base of the case. Also, a high density foam pad has been added between the transducer and the plastic cover, since it has been experimentally confirmed that a moderately elastic pad under compression enhances the adaptability to the metallic wall. The compression level of the foams can be adjusted by the clamping screws.

C. Channel Characterization

The scheme of Fig. 2 has been used for the experimental characterization of the ultrasonic channel. The classical charge amplifier topology based on a high input impedance (FET input) opamp and a feedback RC network has been selected to perform the charge-voltage conversion at the output [29]. A transresistance amplifier has been connected to the negative terminal of the transmitter PT for sensing the current through the input PT for characterization purposes. An electrical impedance of 2 k Ω (in magnitude) has been measured at the PT operation frequency using this system. Moreover, the metal wall has been kept grounded to avoid electrical coupling and thus ensuring a purely mechanical transmission. Under these conditions, the frequency response of the system of Fig. 2 has been measured using a network analyzer.

The obtained results are shown in Fig. 3, in which the normalized channel response of Fig. 3(a) (a zoom of the zone of interest is provided in Fig. 3(b)) is compared with the frequency response of both transducers directly connected back-to-back (Fig. 3(c), with zoom in Fig. 3(d)). Note that a highly selective frequency response with numerous peaks and valleys separated by a few hundred Hz is obtained. This is a typical behavior in through-wall ultrasonic channels (e.g. [18, 22, 24]) due to the acoustic impedance mismatch in the different interfaces that produces multiple reflections, leading to complex highly reverberant channels. Also, interference due to diffraction effects [9] can affect the characteristics of the channel, as previously explained.

Consequently, the envelope shape and the optimal transmission frequency of the spectra of Figs. 3(a) and 3(b) can significantly vary for each transducer placement due to the irregularities of the container wall. In order to statistically characterize the frequency for maximum power transmission (f_{MPT}), the placement of both transducers at different points of the steel plate has been monitored for 100 realizations. The obtained f_{MPT} varies from 38 kHz to 48 kHz, being between 41 kHz and 45 kHz for more than 75% of the cases.

Similarly, the effect of misalignment between transducers was also investigated but well reproducible results could not be obtained. Although a pattern of constructive and destructive interferences could be roughly deduced by progressively displacing one of the transducers in steps of 1 cm, strong variations were obtained for each experiment realization. Hence, one may conclude that the aforementioned variability associated to the transducer attachment clearly dominates over the effect of misalignments.

III. BASIC MODULATIONS AND DETECTION SCHEMES

As mentioned in Section I, this work is focused on low-rate low-power communication (well suited to low-cost container monitoring), so simple modulation schemes based on different paradigms (amplitude, frequency and time position) with no equalization and low computational cost are explored. Specifically, the four basic modulations in Fig. 4, together with the detection schemes of Fig. 5, were implemented.

In the well-known On-Off Keying (OOK) modulation of Fig. 4(a) the sinusoidal carrier is multiplied by a unipolar NRZ signal, so the power spectral density (PSD) of the complex envelope can be expressed as

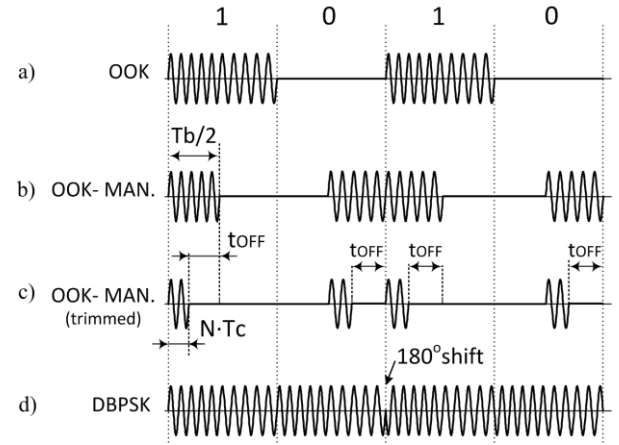


Fig. 4. Waveform diagrams for the tested modulations (the ratio T_b/T_c ratio is not realistic, it has been scaled for the sake of clarity).

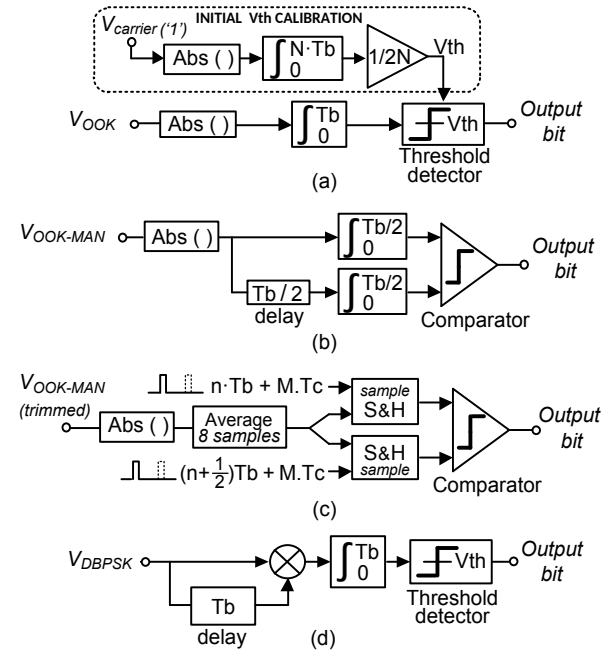


Fig. 5. Detection schemes employed for the tested modulation schemes of Fig. 4. (a) OOK (b) OOK-Manchester (c) trimmed version of OOK-Manchester (d) DBPSK

$$\mathcal{P}_{OOK}(f) = \frac{A_c^2}{2} \left[\delta(f) + T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \right] \quad (1)$$

where A_c is the carrier amplitude and T_b is the bit period [30]. The null-to-null BW of the resulting *sinc* shape is $2/T_b$. The corresponding detection scheme is shown in Fig. 5(a): the optimal threshold value V_{th} is calculated by a calibration routine during 16 bit periods, assuming equally likely '1' and '0'. Then the absolute value of the received signal is integrated during T_b and compared to V_{th} to get the received bit.

In order to improve robustness against channel variations, the OOK-Manchester modulation of Fig. 4(b) was also tested. This approach, which is equivalent to a band-pass 2-PPM (Pulse Position Modulation), does not require a static threshold value, as bit decision is locally made for each T_b . However, two symbols per bit are needed, leading to a worst-case null-to-null BW of $4/T_b$, which is twice the BW of the

conventional OOK scheme (1). The detection strategy is again based on integration of the received signal. In this case a register is required to store the samples of the first $T_b/2$ to later compare the energy of both half-periods as shown in Fig. 5(b).

A lower computational cost alternative for the detection of the OOK-Manchester signal is shown in Fig. 5(c). In this case, the absolute value of the received samples goes through an 8-sample register, whose average value is sampled twice per bit: in $n \cdot T_b + M \cdot T_c$ and $[(n+1/2) \cdot T_b] + M \cdot T_c$, where T_c is the carrier signal period and n and M are natural numbers. Both sampled values are saved and compared at the end of the bit period to get the transmitted bit. The duration of the transmission has been set to $M=10$ cycles because it has been experimentally checked that this is the minimum number of periods for reaching a steady amplitude in reception. The trimmed version of the OOK-Manchester signal illustrated in Fig. 4(c) is employed in this case, in order to optimize the transmitted power. Note that the signal power received between the sampling time and the end of the corresponding semi-period (t_{OFF} in Fig. 4(c)) would be wasted if the waveform of Fig. 4(b) was employed instead. In summary, this scheme leads to a tradeoff between robustness and simplicity, although a precise clock synchronization becomes critical.

Finally, the Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) modulation shown in Fig. 4(d) has been implemented. A 180° shift occurs when a '1' is transmitted, while the signal remains unaltered in case of '0'. This differential configuration is preferred in simple communication systems since it allows a partially non-coherent detection [30], yielding the classical topology based on correlation shown in Fig. 5(d). The samples corresponding to two consecutive bit periods are saved in a register and the correlation between both periods is performed. A negative value of this correlation, implies that a 180° phase shift has occurred ('1'). Otherwise, no phase shift has happened ('0'). Both the robustness and the computational cost of this detection method are theoretically higher than for the other detectors of Fig. 5. Concerning BW, the PSD of a BPSK modulation [30], considering the worst case (a 180° phase shift every bit period), is

$$\mathcal{P}_{BPSK}(f) = A_c^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \quad (2)$$

which leads to a null-to-null BW of $2/T_b$, as for OOK.

IV. EXPERIMENTAL BER TESTING

An experimental comparison of the proposed modulations in terms of BER is performed in this Section. A Xilinx Spartan 3AN board has been used to implement a FPGA-based measurement setup [27] according to the scheme of Fig. 6. The tests are performed on a total of 5000 packages of 1000 bits (5 Mb). Three kinds of measurements have been carried out: BER under parasitic mechanical vibrations, BER under parasitic electrical signals applied to the metal wall and BER vs. bit rate. A Pasco SF-9324 vibrator (shaker) was used to produce the mechanical perturbations. Likewise, the parasitic electrical signals have been directly applied from a waveform generator to the metallic plate. A photograph of the complete experimental setup is shown in Fig. 7. The optimal carrier frequency has been manually set and an input signal of only

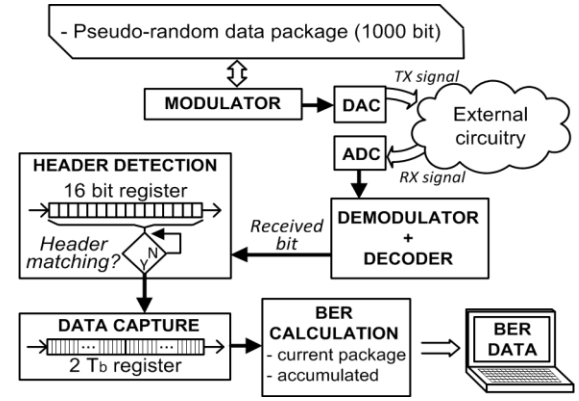


Fig. 6. Block diagram of the software for BER testing.

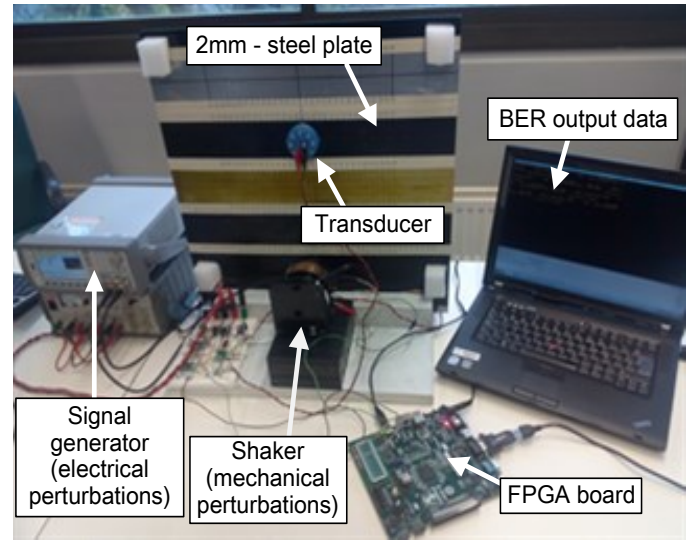


Fig. 7. Photograph of the measurement set-up for BER testing.

100 mV_{pp} has been used for pushing the transducers close to their limit of operation, thus facilitating the BER comparison.

A. BER Under Parasitic Vibrations

A bit rate of 1 kbps has been set to study the BER under the effect of two kinds of mechanical perturbations. On the one hand, a periodic sinusoidal sweeping between 1 Hz and 1 kHz has been applied to cover the typical low frequency vibration range in maritime and ground transport [31]. On the other hand, rectangular pulses with a duration of 5 ms and separated by 250 ms have been generated to study the behavior of the system under higher frequency shocks and continuous rattling.

The first conclusion is that the OOK modulation of Fig. 4(a) (with the detection scheme of Fig. 5(a)) is clearly unsuitable for this application, because of its evident lack of robustness against minimal channel variations that makes the package reception infeasible. Therefore, BER measurements have been limited to the three other systems, whose results are shown in Table I and Table II. Note that the DBPSK modulation (Figs. 4(d) and 5(d)) is clearly the most robust option in both cases followed by the OOK-Manchester with detection based on integrators (Fig. 5(b)). Lastly, the simplified detection system of Fig. 5(c) reveals the worst results.

TABLE I
BER RESULTS WITH LOW-FREQUENCY (1Hz-1kHz) MECHANICAL
VIBRATIONS APPLIED TO THE STEEL WALL

Vin vibrator (Vp)	BER (errors per 1000 bit)		
	OOK-Man. Type 1 (Figs. 4(b) and 5(b))	OOK-Man. Type 2 (Figs. 4(c) and 5(c))	DBPSK (Figs. 4(d) and 5(d))
4	0.124	0.766	0 ¹
5	1.192	3.404	0 ¹
6	>5	>5	0.015
7	No Data ²	No data ²	>5

TABLE II
BER RESULTS WITH MECHANICAL PULSES WITH DURATION OF 5MS
APPLIED TO THE STEEL WALL

Vin vibrator (Vp)	BER (errors per 1000 bit)		
	OOK-Man. Type 1 (Figs. 4(b) and 5(b))	OOK-Man. Type 2 (Figs. 4(c) and 5(c))	DBPSK (Figs. 4(d) and 5(d))
2	0.011	0.618	0 ¹
3	1.291	3.354	0 ¹
4	3.276	>5	0 ¹
5	>5	No data ²	0.128
6	No data ²	No data ²	0.713
7	No data ²	No data ²	1.103
8	No data ²	No data ²	>5

TABLE III
BER RESULTS WITH HIGH-FREQUENCY (100 kHz - 10 MHz)
ELECTRICAL SIGNALS APPLIED TO THE STEEL WALL

Vin vibrator (Vp)	BER (errors per 1000 bit)		
	OOK-Man. Type 1 (Figs. 4(b) and 5(b))	OOK-Man. Type 2 (Figs. 4(c) and 5(c))	DBPSK (Figs. 4(d) and 5(d))
0.4	0 ¹	0.785	0 ¹
0.5	0 ¹	1.101	0 ¹
0.6	0 ¹	>5	0 ¹
0.9	0.163	No data ²	0 ¹
1	1.357	No data ²	0 ¹
1.1	>5	No data ²	0 ¹
1.2	No data ²	No data ²	0.007
1.3	No data ²	No data ²	3.163
1.4	No data ²	No data ²	>5

¹ 'BER=0' strictly equals to BER < 2 · 10⁻⁷ (test performed over 5 Mbit).

² 'No data' fields indicate that a smooth transmission could not be reached.

B. BER Under Parasitic Electrical Signals

Two kinds of parasitic electrical chirp have been applied to the metallic wall for this experiment: large-amplitude low-frequency signals (amplitude of 20 V_{pp} and frequency sweep between 0.1 Hz and 1 kHz) and high-frequency signals (chirp between 100 kHz and 10 MHz with variable amplitude). The purpose of the low frequency perturbations is to produce large electrical fields, thus emulating parasitic effects such as electrostatic charge and electrical drifts. On the other hand, the higher frequency chirp aims to model the effect of possible coupling from electrical sources present in the means of transport. Moreover, parasitic signals of several MHz can also be generated from surrounding radiation due to the antenna effect of the whole cargo container (or stack of containers). The bit rate has been set again to 1 kbps.

The measurement results concerning low-frequency perturbations conclude that the system is highly robust against slow voltage variations, even if large amplitudes are applied. No bit errors have been obtained both for the DBPSK scheme of Fig. 5(d) and for the OOK-Manchester detector based on integration of Fig. 5(b), while a BER below 10⁻⁶ has been measured for the system of Fig. 5(c). However, a more harmful effect has been evidenced for high frequency perturbations. As can be seen from Table III, the evolution of the different systems is very similar to the scenario with mechanical vibrations despite of the different nature of the interference. Once again, the DBPSK scheme clearly yields the best results, followed by the two OOK-Manchester detectors. Note that the relative performance of the simple system of Fig. 5(c) versus the configuration of Fig. 5(b) is poorer than under mechanical parasitic signals.

C. BER versus Bit Rate

A study of the maximum bit rate for the three detection schemes of Fig. 5(b), Fig. 5(c) and Fig. 5(d) has been performed in absence of parasitic perturbations in order to characterize the channel limits in an ideal environment. Under these conditions, an error-free transmission of the 5 Mbit test data has been carried out successfully at 3.5 kbps for the DBPSK scheme, while bit errors appear for the OOK-Manchester at bit rates higher than 2 kbps when the detector of Fig. 5(b) is employed. The alternative of Fig. 5(c) works with no errors for low bit rates of 1-1.5 kbps, but the communication becomes precarious for higher bit rates, collapsing at 2 kbps approximately.

V. PROPOSED LOW-POWER LOW-RATE DIGITAL DBPSK MODULATOR

The previously tested DBPSK scheme (Figs. 4(d)-5(d)) has demonstrated to be the most suitable modulation for the proposed ultrasonic channel due to its good tradeoff between robustness and computational cost.

On this basis, the digital DBPSK modulator shown in Fig. 8 is proposed in this Section. This idea exploits the highly selective bandpass frequency response of the ultrasonic channel (see Fig. 3(a)), which leads to a pseudo-sinusoidal shape at reception when a square carrier is employed in transmission. The filtering out of the high frequency components by the channel implies an inherent energy loss, but some important advantages are obtained in exchange:

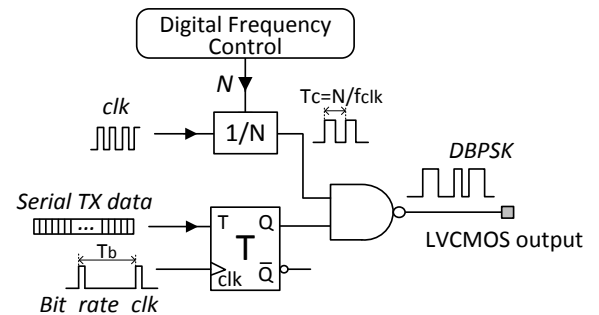


Fig. 8. Proposed DBPSK digital modulator using a square signal from a LVCMOS output port.

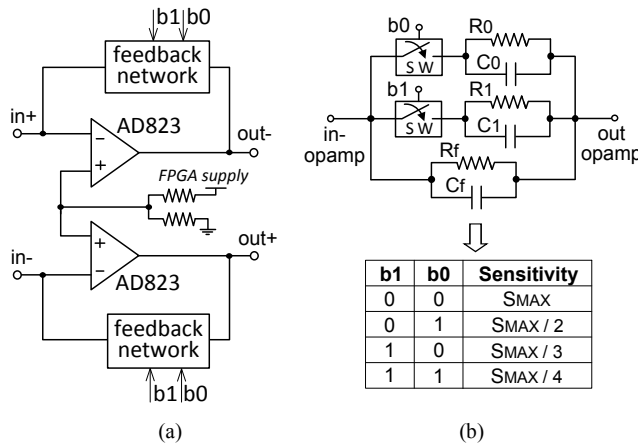


Fig. 9. Proposed pseudo-differential charge amplifier with programmable sensitivity (a) General schematic (b) Detail of feedback network and sensitivity values.

- 1) The typical DAC block [16, 17] becomes unnecessary, reducing cost and power consumption. Moreover, a simple DBPSK modulator using a digital carrier can be implemented by means of a T-type flip-flop and a NAND gate, as illustrated in Fig. 8.
- 2) Despite the aforementioned amplitude constraints, the carrier frequency resolution is multiplied by the number of cycles required by the DAC for generating an analog sample (64 cycles in the current on-board DAC). This resolution enhancement may become essential in such a reverberant channel with frequency peaks and valleys separated by a few hundred Hz, as seen in Fig. 3(b). Specifically, any frequency given by f_{clock} / N can be generated, where f_{clock} is the frequency of the board clock and N is a natural number.
- 3) Due to the low-voltage low-power operation, the transmitter PT can be directly driven by the digital output of the FPGA board, thus making unnecessary the use of power amplifiers [22-25] or other driving devices [19, 26]. Typically, the LVC MOS ports of common digital devices are able to source up currents of tens of mA, which clearly fulfills the requirements of the transmitter PT. Concerning the amplitude of the square carrier, a number of voltage levels for the LVC MOS buffers have been defined by the standards of the Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC), decreasing from 3.3 V to less than 1 V.

VI. IMPROVED COMMUNICATION USING AMPLITUDE AND FREQUENCY TRACKING

As studied in Section II, one of the challenges of through-wall ultrasonic communication is to deal with the variable and unpredictable channel characteristics. With the aim of alleviating this problem, amplitude and frequency tracking capabilities have been developed for the DBPSK scheme defined in the previous Section.

A. Amplitude tracking using a digitally programmable charge amplifier.

Although charge amplifiers are commonly used in charge-mode sensor interfaces, most of works related to through-wall

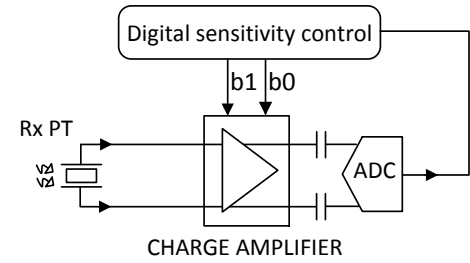


Fig. 10. Block diagram of the proposed output amplitude tracking system

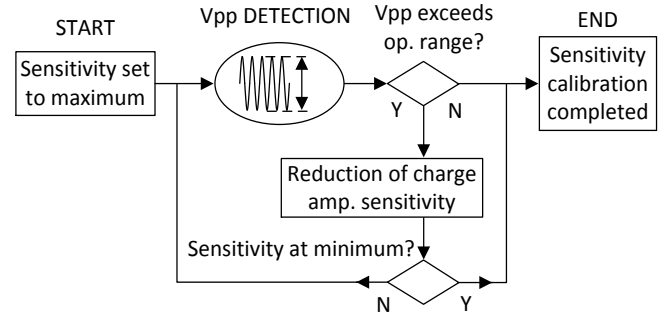


Fig. 11. Flow diagram of the proposed output amplitude tracking system

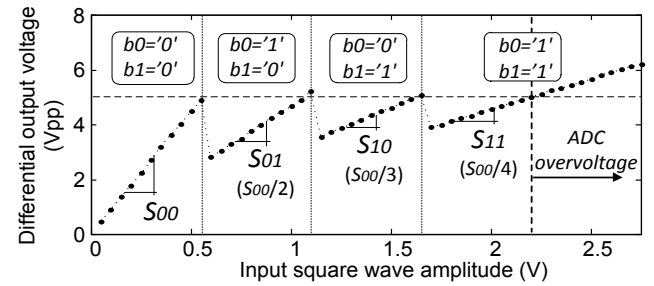


Fig. 12. Validation of the output amplitude tracking system: differential voltage at the output of the charge amplifier versus the input square wave amplitude (rising sweeping from 0 to 2.7 V).

ultrasonic communication just make use of the own capacitive nature of the PT to convert charge to voltage (shunt amplifier) [9, 16, 18, 20-22, 24], performing subsequently a direct voltage amplification or rectification. The main drawback of this voltage mode scheme is its strong dependence on the parasitic impedance of the sensor, which may present a large spread due to fabrication tolerances and temperature. Moreover, sensitivity cannot be modified without affecting BW and noise. In contrast, when using a charge amplifier the input charge is almost completely transferred to the feedback capacitor, so the output voltage is directly proportional to the charge and inversely proportional to the capacitance value. Nonetheless, the use of charge amplifiers in the related literature is limited to the basic topology employed in [25].

In this connection, the digitally-programmable charge amplifier shown in Fig. 9(a) has been designed for both providing signal conditioning and sensitivity tunability. It is based on the Analog Devices AD823 FET-input opamp mounted on a prototype board and supplied by the FPGA 3.3 V supply voltage. A pseudo-differential configuration using two amplifiers has been employed [29]. This configuration

doubles the sensitivity and enhances the rejection of common mode parasitic signals, at the expense of also doubling power consumption. The digitally-programmable RC network of Fig. 9(b) has been used for sensitivity tuning.

The sensitivity S of a charge amplifier is inversely proportional to the feedback capacitance C_{FB} ($S=1/C_{FB}$), yielding a high-pass response with a cutoff frequency $f_c=1/(2\pi C_{FB} R_{FB})$, where R_{FB} is the feedback resistance. The capacitor C_f has been set to 10 pF, while C_0 and C_I have been empirically chosen to divide the maximum sensitivity ($b_0=b_I=0^\circ$) by 2 ($b_0=1^\circ$ and $b_I=0^\circ$), by 3 ($b_0=0^\circ$ and $b_I=1^\circ$) or by 4 ($b_0=b_I=1^\circ$). Finally, R_0 and R_I have been properly set to keep f_c approximately constant at 15 kHz.

The charge amplifier programmability has been exploited to design an amplitude tracking system in reception, in order to maximize the output signal without exceeding the ADC input range. The corresponding block diagram is shown in Fig. 10, while the flow diagram of the algorithm is provided in Fig. 11. It has been digitally implemented by using the Xilinx Spartan 3AN board and the on-board ADC LTC1407A-1 also employed in Section IV. The sensitivity is set to its maximum by default ($b_0=b_I=0^\circ$) and the peak-to-peak value of the received signal is digitally measured. If an overvoltage is detected at the ADC input, the sensitivity is reduced. This procedure is repeated until the signal is within the valid range or the minimum sensitivity is reached.

This tuning technique has been experimentally validated by manually increasing the voltage level at the input transducer in steps of 50 mV up to 2.7 V, leading to the results shown in Fig. 12. The differential output voltage is plotted versus the input square signal. Note that the sensitivity switches down each time the ADC maximum input range is reached, which corresponds to 5 V_{pp} at the differential output.

B. Frequency tracking

As previously mentioned, the choice of the optimal transmission frequency in a reverberant channel becomes a challenging task. Chirp signals, widely employed in acoustic imaging for decades [32], have been applied in through-wall ultrasonic communication in [22] for ensuring at least a part of the power to be transmitted at favorable frequencies, at the expense of power efficiency. In contrast, a frequency and amplitude tracking algorithm was used in [18] for establishing the optimal frequency for power and high-rate data transmission. In this reference, a frequency sweep is also performed exploiting the accurate frequency tunability of the digital carrier, but the low-power low-voltage approach of our proposal implies additional constraints with respect to [18]. Firstly, the amplitude of the transmitted signal cannot be adapted, as it comes directly from a digital LVCMOS output. Secondly, the maximum amplitude at reception is also limited, since amplitudes larger than 2.5 V_{pp} would exceed the ADC range.

Assuming this, a system for optimal transmission frequency tracking has been implemented. Its block diagram and flow chart are shown in Fig. 13 and Fig. 14 respectively. A frequency sweep is performed in steps of a predefined duration ($T_{test}=100$ ms by default). The absolute value of the received signal is integrated (summed) and the maximum power frequency f_{opt} is returned to the transmitter. Note at this

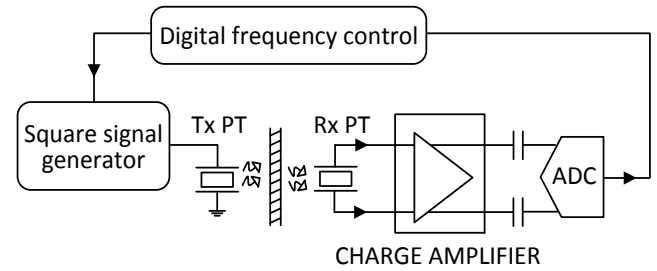


Fig. 13. Block diagram of the proposed tracking system for optimal transmission frequency.

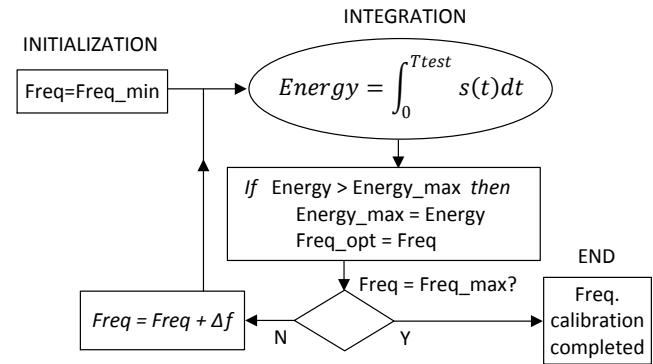


Fig. 14. Flow diagram of the proposed tracking system for optimal transmission frequency.

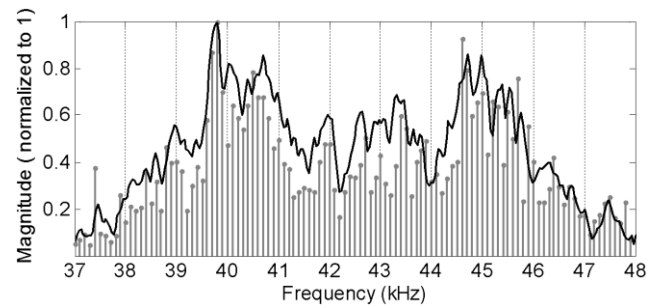


Fig. 15. Application example of the proposed frequency tracking algorithm. Frequency response measured by a spectrum analyzer (black) and normalized energy given by the frequency tracking algorithm at every tested frequency (grey bars).

point that a two-way communication would be required in practice to return the f_{opt} value to the transmitter, but it would require a high level development of a two-way communication with the corresponding development of communication protocols and hardware duplication, which is out of the scope of this work.

In order to prove the validity of the optimal frequency tracking algorithm, a linear frequency sweep with steps of approximately 100 Hz (and a integration time of $T_{test}=100$ ms per step) has been performed between 37 kHz and 48 kHz, using a 0.9 V input square signal. The integration results have been saved for every tested frequency, leading to the graph of Fig. 15. The normalized energy has been plotted in grey bars, while the black solid line is the channel frequency response given by a network analyzer for comparison. Note that an optimal frequency of 39.8 kHz is obtained in both cases, and both measurements follow similar tendencies only differing in a scale factor.

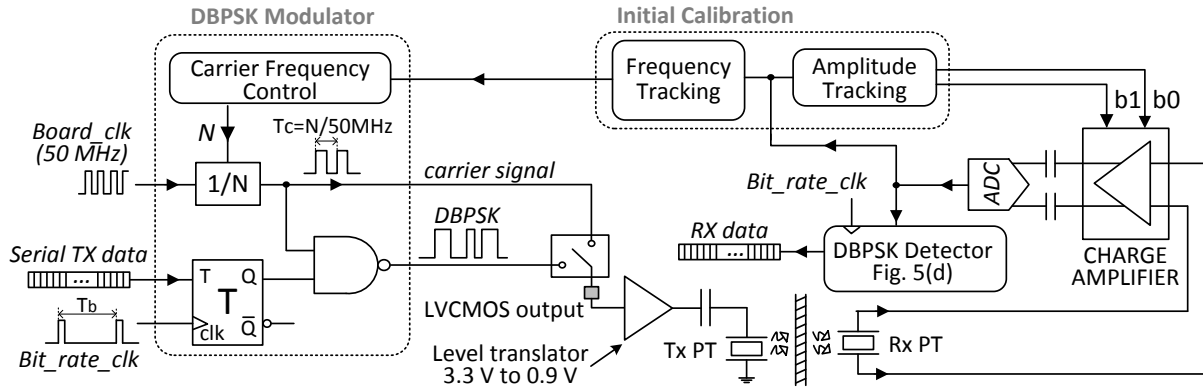


Fig. 16. Complete block diagram of the implemented through-metal communication system including the presented contributions.

VII. COMPLETE FRONT-END ARCHITECTURE

A complete front-end diagram including the contributions presented in the previous Sections is shown in Fig. 16. The whole digital circuitry and algorithms have been FPGA implemented. The frequency tracking block controls the carrier frequency of the digital DBPSK modulator, which provides two selectable outputs: the carrier signal, for calibration purposes, and the DBPSK signal for the subsequent data transmission.

A 900 mV square carrier has been employed. This value has been arbitrarily chosen for power efficiency reasons according to the LVCMOS09 JEDEC standard. However, the voltage levels of the digital ports could not be set below 2.5 V in the employed board, so an extra level translator was employed to convert the voltage level to 0.9 V. However, this adaptation does not affect the subjacent idea, as typically LVCMOS buffers can source up currents of tens of mA, clearly higher than the current signal applied to the transmitter PT as

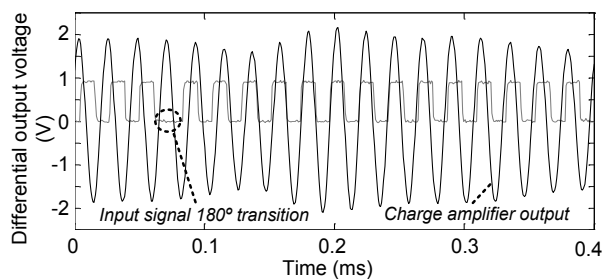


Fig. 17. Transmitted square wave between 0 V and 900 mV and received differential voltage at the output of the charge amplifier.

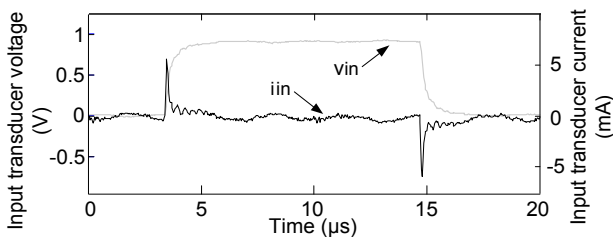


Fig. 18. Transient voltage and current at the input transducer (the square carrier V_{in} is captured before the decoupling capacitor). Current has been measured using the setup of Fig. 2.

mentioned in Section V.

Although data rates of 3.5 kbps with a $BER < 2 \cdot 10^{-7}$ were achieved in Section IV for the DBPSK scheme of Fig. 5(d), the bit rate of this final system has been set to 1 kbps, both providing enough capacity for container monitoring and extra robustness against environmental hostility.

A. Experimental validation of the front-end

In order to illustrate the operation of the entire system of Fig. 16, a single calibration has been performed once the transmitter and receiver PTs have been placed on the test steel plate. Note that the periodicity with which the calibration process should be performed in a real scenario depends on the transducer fixation quality and the environmental hostility against the PT coupling, so it must be evaluated in each particular case.

Concerning this test, the sensitivity of the charge amplifier has been set to its minimum, and the frequency tracking routine has been executed leading to an optimal frequency of 44.3 kHz. Then, the maximum sensitivity has been set ($b_1 = b_0 = 0$), which has been subsequently reduced to one half of the maximum value ($b_1 = 0$ and $b_0 = 1$) by the amplitude tracking algorithm.

The differential voltage at the charge amplifier outputs is shown in Fig. 17 for illustrative purposes, emphasizing the behavior around a 180° phase shifting.

Finally, a capture of the voltage and current waveforms at the input transducer is shown in Fig. 18. Although an input impedance (in magnitude) of $2 \text{ k}\Omega$ was estimated for the input PT at 40 kHz in Section II, the use of a square carrier involves significant higher frequency components driving a lower impedance due to the capacitive nature of the transducer (note the peak currents associated to voltage edges in Fig. 18). For this reason, the average dynamic power has been calculated applying the integration function of the oscilloscope to the product of both curves of Fig. 18 over one period of the square carrier, leading to a transmitted power of $382 \text{ }\mu\text{W}$.

A report of the experimental results is provided in Table IV together with a summary of related low-rate through-wall ultrasonic communication works. Simple modulation schemes are the preferred option in most cases, as they allow fulfilling low-rate requirements. However, note that a low-power approach in transmission is only feasible for thin walls of few

TABLE IV
SUMMARY OF PUBLISHED LOW-RATE FRONT-ENDS FOR THROUGH-WALL ULTRASONIC COMMUNICATION

Ref.	Transducer Type	Removable Transducer	Transducer Area (mm ²)	Medium Material	Tx Distance (mm)	Input Power/Voltage	Transducer	Modulation	Carrier Frequency	Bit Rate
This work	Piezo.	Yes	506	Steel	2	0.9 V ¹ - 0.38 mW		DBPSK	≈ 40 kHz	1-3.5 kbps
[25] Hidalgo-Fort 2017	Piezo.	Yes	506	Steel	10	3.3 V		DBPSK	40 kHz	5 kbps
[22] Chakraborty 2015	Piezo.	No	225	Steel	4500 ²	5 mW		Chirp-OOK	1 MHz	100 bps
[18] Ashdown 2013	Piezo.	No	506	Steel	57.15	> 30 V		AM	1 MHz	30 kbps
[24] Hosman 2011	Piezo.	Yes ³	487	Steel	N/A ⁴	9.6 V _{pp}		MFSK	260-330 kHz	360 bps
[9] Graham 2011	EMAT	Yes	N/A	Steel	25.4 (1'')	1.23 W		QPSK	1 MHz	1 Mbps
[23] Kluge 2008	Piezo.	No	50	Aluminium	7	30 V		AM	3 MHz	1-1.5 kbps
[26] Murphy 2006	Piezo.	Yes ³	254	Steel	115	20 V _{pp}		DBPSK	1 MHz	5 kbps
[21] Saulnier 2006	Piezo.	No	506	Steel	152.4 (6'')	10 V		AM	1 MHz	0.435 kbps

¹ Square carrier signal

² Transversal transmission along a pipeline

³ Transducers fixed by strapping

⁴ Communication between corner posts of abutted cargo containers

millimeters, as the power required for transmission strongly increases for thicknesses of the order of centimeters.

B. Power consumption considerations

The low-power approach presented in this work is focused on the power required by the transmitter transducer (commonly used as a figure of efficiency as can be seen in Table IV) and the simple digital modulation, calibration and detection schemes proposed in the previous Sections. The digital circuitry and software of the system of Fig. 16 have been implemented using the Xilinx Spartan 3AN FPGA board for the sake of versatility, since a complex setup for the BER measurements of Section IV were programmed apart from the final communication system. In fact, other options such as low-power microcontrollers would be a more suitable option for a final whole system implementation in terms of power consumption, given the low computational power requirements.

Despite the above, it is worth it to make some considerations about the power efficiency of the digital part of the system of Fig. 16. Although a precise estimation of the power consumption for FPGA digital circuits is a challenging task [33], the main component of the power consumption is associated to the dynamic power. For a logic gate or connection line, it can be expressed as

$$P_{dynamic} = \alpha \cdot C_L \cdot V_{DD}^2 \cdot f_{clock} \quad (3)$$

where α is the average number of transitions between logic levels in one clock cycle, C_L is the load capacitance of the gate, V_{DD} is the supply voltage and f_{clock} is the clock frequency [33]. Note from (3) that the key factor for reducing the power consumption (apart from minimizing the number of logic gates) is to reduce the clock speed requirements as much as possible.

Focusing on the DBPSK modulator of Fig. 8, this novel scheme only requires 5 logic gates to implement the modulator core (a T flip-flop and a NAND gate). Regarding clock speed, an f_{clock} as low as the modulation frequency (~40kHz) is needed, leading to an insignificant power consumption. In contrast, the typical modulator using a DAC would include a relatively complex digital interface for generating the DAC input bits, and a higher clock rate for generating the analog samples would be required. Concerning the square carrier

generation, the tuning resolution of the carrier frequency f_c is directly proportional to the board clock frequency f_{clock} , as explained in Section V. Specifically, $f_c = f_{clock} / N$, where N is a natural number, leading to a tradeoff between frequency resolution and power efficiency. Nevertheless, the carrier signal is generated by a simple digital counter, so the resulting power consumption is minimal.

In relation to the receiver digital blocks, the primary interest lies in the sampling rate of the ADC, which strongly affects the power consumption of the DBPSK detector. The precision of the correlation function implemented in Fig. 5(d) increases with the number of samples per period at the expense of a significant increment of the computational cost, mainly due to the multiplication of pairs of digital samples. Thus, it arises a tradeoff between detection robustness and power consumption, which should be weighted in function of the environmental conditions in a real scenario.

VIII. CONCLUSION

A low-power low-rate and low-cost through-wall ultrasonic communication front-end conceived for cargo-container monitoring has been presented in this work. A non-invasive placement method for the piezoelectric transducers based on a customized magnetic case has been employed. Several basic modulation schemes have been tested in terms of BER using a FPGA-based measurement setup. External perturbations have been applied for emulating a real environment. Based on the tests results, a DBPSK modulation using a detector scheme based on correlation has been proved to be the most suitable choice for this application. A compact and efficient digital DBPSK modulator using a square digital carrier has been proposed. A tracking system has been designed to optimize both the transmission frequency and the charge amplifier sensitivity in reception. Bit rates of several kbps can be achieved with a transmitted power lower than 0.4 mW. This low-power approach becomes specially desirable for the transducers placed inside the container, which are typically supplied by means of batteries or energy harvesting sources.

REFERENCES

- [1] D. Steenken, S. Voß, and R. Stahlbock, "Container terminal operation and operations research - a classification and literature review," *OR Spectrum*, vol. 26, pp. 3-49, 2004/01/01 2004.
- [2] R. Stahlbock and S. Voß, "Operations research at container terminals: a literature update," *OR Spectrum*, vol. 30, pp. 1-52, 2008.
- [3] T. Notteboom, "Chapter 2 Strategic Challenges to Container Ports in a Changing Market Environment," in *Research in Transportation Economics* vol. 17, pp. 29-52, 2006.
- [4] J. Cam, "Smart container management: Creating value from real-time container security device data," in *2011 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, HST 2011*, pp. 457-465, 2011.
- [5] W. Lang, R. Jedermann, D. Mrugala, A. Jabbari, B. Krieg-Brückner, and K. Schill, "The 'intelligent container' - A cognitive sensor network for transport management," *IEEE Sensors J.*, vol. 11, pp. 688-698, 2011.
- [6] S. Abbate, M. Avvenuti, P. Corsini, B. Panucci, M. Passacantando, and A. Vecchio, "An Integer Linear Programming Approach for Radio-Based Localization of Shipping Containers in the Presence of Incomplete Proximity Information," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, pp. 1404-1419, 2012.
- [7] P. Dittmer, M. Veigt, B. Scholz-Reiter, N. Heidmann, and S. Paul, "The intelligent container as a part of the Internet of Things," in *2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 209-214, 2012.
- [8] Z. H. D.X. Yang, H. Zhao, H.F. Hu, Y.Z. Sun, B.J. Hou, "Through-Metal-Wall Power Delivery and Data Transmission for Enclosed Sensors: A Review," *Sensors*, vol. 15, pp. 31581-31605, Dec. 2015.
- [9] D.J. Graham, J.A. Neasham, and B.S. Sharif, "Investigation of Methods for Data Communication and Power Delivery Through Metals," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 4972-4980, 2011.
- [10] H. Zangl, A. Fuchs, T. Bretterklieber, M. J. Moser, and G. Holler, "Wireless Communication and Power Supply Strategy for Sensor Applications Within Closed Metal Walls," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, pp. 1686-1692, 2010.
- [11] E. B. C. Jaskolski, G. Wilhelm, "Magnetic communication through metal barriers," Patent no. wo/2008/039676, Nov. 2007.
- [12] D. J. Graham, "Investigation of Methods for Data Communication and Power Delivery Through Metals," School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University, September 2011.
- [13] S. K. Oruganti, S. H. Heo, H. Ma, and F. Bien, "Wireless energy transfer-based transceiver systems for power and/or high-data rate transmission through thick metal walls using sheet-like waveguides," *Electronics Letters*, vol. 50, pp. 886-888, 2014.
- [14] S. Legendre, D. Massicotte, J. Goyette, and T. K. Bose, "Neural classification of Lamb wave ultrasonic weld testing signals using wavelet coefficients," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, pp. 672-678, 2001.
- [15] J. Wang, X. Tang, R. X. Gao, L. Duan, and L. Zhang, "On ultrasonic communication through metal structure for machine embedded sensing," *Measurement*, vol. 94, pp. 653-662, 2016.
- [16] T. Lawry, "A high-performance system for wireless transmission of power and data through solid metal enclosures," Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2011.
- [17] R. Primerano, "High bit-rate digital communication through metal channels," Electrical, Computer and Systems Engineering Dept., Drexel University, Philadelphia, 2010.
- [18] J.D. Ashdown, K.R. Wilt, T. J. Lawry, G.J. Saulnier, D.A. Shoudy, H.A. Scarton, and A.J. Gavens, "A full-duplex ultrasonic through-wall communication and power delivery system," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelec., and Freq. Control*, vol. 60, pp. 587-595, 2013.
- [19] M. Bielinski, K. Wanuga, R. Primerano, M. Kam, and K. R. Dandekar, "Application of Adaptive OFDM Bit Loading for High Data Rate Through-Metal Communication," in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, pp. 1-5, 2011.
- [20] T.J. Lawry, K.R. Wilt, J.D. Ashdown, H.A. Scarton, and G.J. Saulnier, "A high-performance ultrasonic system for the simultaneous transmission of data and power through solid metal barriers," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelec., and Freq. Control*, vol. 60, pp. 194-203, 2013.
- [21] G.J. Saulnier, H.A. Scarton, A.J. Gavens, D.A. Shoudy, T.L. Murphy, M. Wetzel, S. Bard, S. Roa-Prada, and P. Das, "PIG-4 Through-Wall Communication of Low-Rate Digital Data Using Ultrasound," in *2006 IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 1385-1389, 2006.
- [22] S. Chakraborty, G.J. Saulnier, K.W. Wilt, E. Curt, H.A. Scarton, and R.B. Litman, "Low-power, low-rate ultrasonic communications system transmitting axially along a cylindrical pipe using transverse waves," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 62, pp. 1788-1796, 2015.
- [23] M. Kluge, T. Becker, J. Schalk, and T. Otterpohl, "Remote acoustic powering and data transmission for sensors inside of conductive envelopes," in *2008 IEEE Sensors*, pp. 41-44, 2008.
- [24] T. Hosman, M. Yearly, and J. K. Antonio, "Design and Characterization of an MFSK-Based Transmitter/Receiver for Ultrasonic Communication Through Metallic Structures," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, pp. 3767-3774, 2011.
- [25] E. Hidalgo-Fort, J.R. Garcia-Oya, F. Muñoz-Chavero, and R.G. Carvajal, "Intelligent Containers Based on a Low-Power Sensor Network and a Non-Invasive Acquisition System for Management and Tracking of Goods," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. PP, pp. 1-6, 2017.
- [26] T. L. Murphy, "Ultrasonic Digital Communication System for a Steel Wall Multipath Channel: Methods and Results," Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, New York, 2006.
- [27] S.M. Berber, "An automated method for BER characteristics measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, pp. 575-580, 2004.
- [28] P. Giannelli, G. Calabrese, G. Frattini, M. Granato, and L. Capineri, "A Buffered Single-Supply Charge Amplifier for High-Impedance Piezoelectric Sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, pp. 368-376, 2019.
- [29] M. Massarotto, A. Carlosena, and A. J. Lopez-Martin, "Two-Stage Differential Charge and Transresistance Amplifiers," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, pp. 309-320, 2008.
- [30] L. W. Couch II, *Digital and Analog Communication Systems*, Ed. Pearson, 2013.
- [31] E.A. Lahti, S.B. Ross, S.T. Maheras, "Transportation Shock and Vibration Literature Review," *University of North Texas Libraries, Digital Library*, DOI: 10.2172/1083410, June 6, 2013.
- [32] M. Siegal, "Measurement issues in quantitative ultrasonic imaging," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 6, pp. 1435-1438, Dec. 1998.
- [33] R. Jevtic, C. Carreras, "Power Measurement Methodology for FPGA Devices," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 6, pp. 237 - 247, Jan. 2011



José María Algueta Miguel was born in Hecho, Huesca, Spain. He received the Telecommunications Engineering and Ph.D. degrees from the Public University of Navarra, Spain, in 2008 and 2012 respectively. Currently, he is a researcher with the same university. He has been an invited researcher with the University College Dublin (UCD), Dublin, Ireland,

in 2011, with the New Mexico State University, Las Cruces (NM), USA, in 2013, and with the Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Puebla, Mexico, in 2015. His research interests are related to low-power low-voltage analog design, mixed-mode circuits and signal processing, and sensor interfaces.



José Ramón García Oya was born in Seville, Spain. He received the Telecommunications Engineering, Master in Electronics, Signal Processing and Communications and Ph.D. degrees from the University of Seville, Spain, in 2007, 2008 and 2013 respectively. Since 2007, he has been with the Electronic

Engineering Group, Department of Electronic Engineering, University of Seville, where currently he is assistant professor. He has been an invited researcher in the University of Grenoble, France, in 2010, the University of Calgary, Canada, in 2011, the University of Massachusetts Amherst, USA, in 2013, and the University of Paris Saclay, France, in 2017. His research interests include sub-sampling based receivers, multi-standard data acquisition systems, compressive sensing techniques, and ultrasonic communication systems for IoT applications.



Antonio J. López Martín (M'04, SM'11) received the M.S. and Ph.D. degrees (with honors) from the Public University of Navarra, Pamplona (Spain) in 1995 and 1999, respectively. He has been a visiting professor with the New Mexico State University, Las Cruces, NM, and an invited researcher with the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich. Currently, he is Research Director and Professor with the Public University of Navarra and an Adjunct Professor with the New Mexico State University. His research interests include wireless transceivers and sensor interfaces with emphasis on low-voltage low-power implementations. He has published more than 425 technical contributions in books, journals, and conferences. He also holds 6 international patents, leads various research projects and is consultant for local companies.

Dr. Lopez is currently Chair of the IEEE CASS Spain Chapter. He was an Associate Editor of the IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-II: EXPRESS BRIEFS (2006-2007) and the IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-I: REGULAR PAPERS (2008-2009). He is also in the technical committee of several conferences. He received the Talgo Technological Innovation Award in 2012, the ANIT's Engineer of the Year Award in 2008, the Caja Navarra Research Award in 2007, the Young Investigator Award from the Complutense University of Madrid in 2006, the 2005 IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION Best Paper Award, and the European Center of Industry and Innovation (CEIN) Award in 2004 for excellence in transfer of research results to industry.

Carlos A. de la Cruz Blas received the M.Sc. degree in electronic engineering from the Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), Puebla, México, and the Ph.D. degree (with honors) in electrical engineering from the Public University of Navarra, Pamplona, Spain, in 1999, and 2004, respectively. In 2006 he was an invited researcher in the School of Electrical, Electronic and Mechanical Engineering at University College Dublin, Ireland. Currently, he is an Associate Professor at the Public University of Navarre. His research interests include low-voltage analog, mixed-mode integrated circuits, instrumentation, sensors, and nonlinear circuits.



Fernando Muñoz Chavero (M'05) was born in El Saucejo, Sevilla, Spain. He received the Telecommunications Engineering and Ph.D. degrees from the University of Seville, Seville, Spain, in 1998 and 2002, respectively. Since 1997, he has been with the Department of Electronic Engineering, School of Engineering, University of Seville, where he has been an Associate Professor since 1999. In 2000 and 2002, he was a Visiting Researcher at Natlab, Philips Research, Eindhoven, The Netherlands, and in 2003, in the Klipsch School of Electrical Engineering, New Mexico State University, Las Cruces. His research interests are related to low-voltage low-power analog circuit design, analog-digital and digital-analog conversion, and analog and mixed-signal processing.



Eduardo Hidalgo Fort received the Telecommunications Engineering Degree and the Master in Electronics, Communications and Signal Processing in 2011 and 2013, respectively, from University of Seville. Since 2010 he has been working in the Electronic Department of University of Seville. In 2012 he was visiting researcher in LCIS-Grenoble INP (Laboratoire de Conception et d'Integration des Systemes) for 4 months and he was visiting researcher in CERN for 2 months in 2017. He has worked and researched about sensors networks, data acquisition, data collection and data integration in large database or platforms like Fiware. He is currently working towards his PhD. His interests are related to sensor networks, data integration and systems for wireless communications.

“Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments”, *MDPI Sensors*, 2019

Article

Passive RFID-Based Inventory of Traffic Signs on Roads and Urban Environments

José Ramón García Oya ^{1,*}, Rubén Martín Clemente ² , Eduardo Hidalgo Fort ¹,
Ramón González Carvajal ¹ and Fernando Muñoz Chavero ¹

¹ Department of Electronics Engineering, University of Seville, 41092 Seville, Spain; ehidalgo@us.es (E.H.F.); carvajal@us.es (R.G.C.); fmunoz@us.es (F.M.C.)

² Department of Signal Theory and Communications, University of Seville, 41092 Seville, Spain; ruben@us.es

* Correspondence: jose.garciaoya@gie.esi.es; Tel.: +34-954-487-375

Received: 5 June 2018; Accepted: 19 July 2018; Published: 22 July 2018



Abstract: This paper presents a system with location functionalities for the inventory of traffic signs based on passive RFID technology. The proposed system simplifies the current video-based techniques, whose requirements regarding visibility are difficult to meet in some scenarios, such as dense urban areas. In addition, the system can be easily extended to consider any other street facilities, such as dumpsters or traffic lights. Furthermore, the system can perform the inventory process at night and at a vehicle's usual speed, thus avoiding interfering with the normal traffic flow of the road. Moreover, the proposed system exploits the benefits of the passive RFID technologies over active RFID, which are typically employed on inventory and vehicular routing applications. Since the performance of passive RFID is not obvious for the required distance ranges on these in-motion scenarios, this paper, as its main contribution, addresses the problem in two different ways, on the one hand theoretically, presenting a radio wave propagation model at theoretical and simulation level for these scenarios; and on the other hand experimentally, comparing passive and active RFID alternatives regarding costs, power consumption, distance ranges, collision problems, and ease of reconfiguration. Finally, the performance of the proposed on-board system is experimentally validated, testing its capabilities for inventory purposes.

Keywords: inventory; infrastructure-to-vehicle; location systems; radio propagation; RFID; traffic signs; urban environment

1. Introduction

Road maintenance companies keep a record of the location and date of installation of all the traffic signs placed on the roadways, which helps to determine which of them have to be replaced for age reasons, as well as to plan the installation of new traffic sign infrastructure. These records soon become out of date because a large number of traffic signs disappear annually due to accidents or acts of vandalism. To keep the inventory system updated, traffic routes are regularly inspected by vehicles equipped with video cameras. Traditionally, the detection of the traffic signs in the images has been performed offline by human operators, which is expensive and time-consuming. Computer-based traffic sign detection and recognition seems to be an interesting alternative that has been widely used for applications such as speed control [1] or detection of road intersections [2] and lanes [3]. However, its performance can be degraded when the signs are partially hidden, as often occurs with urban facilities [4], or if the quality of the images is poor, which happens, for example, when the weather is adverse or in conditions of darkness [5]. Therefore, recent research has been proposed to overcome these limitations, by proposing novel approaches, such as those based on 3D recognition and location of traffic signs [6], redundant multiple-view architectures combining 2D and 3D techniques [7],

or by collecting information from databases such as Google Street View with location purposes [8]. These approaches have also contributed to automatize all the inventory process and reduce the need for manual assessments of the captured images, thus reducing the post-processing times and costs, as well as the sensitivity to human errors, increasing the number of inspections that can be performed. However, even though accurate detection has been reported (94.63% in [8]), the computational burden of image-processing approaches still remains as a limiting factor, especially when implementing the most novel and accurate techniques, such as 3D reconstruction algorithms [6]. Furthermore, note that the inspection vehicle usually travels at a low speed, around 60 Km/h on roadways, because it also has to measure the camber of the road and other parameters. Therefore, to prevent affecting the traffic flow, it would be desirable to conduct the inspections at night; however, this is hardly compatible with capturing accurate images, which are detected at day in the previously referenced works [6–8].

The alternative to video-based inventory systems may be based on radio-frequency identification (RFID) technology. Basically, it requires placing a RFID tag at each traffic sign or urban facility, and a RFID reader in the inspection vehicle, whose purpose is to scan for RFID tags in its coverage area. RFID is a mature technology that is successfully used in many industries to track and manage goods and merchandise, while avoiding the inherent disadvantages of video-based systems. More specifically, the last decade has witnessed a flurry of research for applying RFID technology to the development of smart roads, incorporating RFID to traffic management applications. For example, the use of RFID for electronic toll collection at highways, for access control systems of vehicles in parking lots, to control traffic congestion, or to restrict traffic in designated areas in cities are well-known. A summary of different RFID based recent approaches for road applications is listed in Table 1.

Table 1. RFID systems for road applications.

Work	Application	Technology	Frequency (MHz)
[9] Sato, 2006	In-vehicle traffic sign detection	Passive	13.56
[10] Mariut, 2012	In-vehicle traffic sign detection	Active	2400–2483
[11] Paul, 2012	Traffic sign alert system	Active	867
[12] Pérez, 2010	Intelligent speed controller	Active	433
[13] Song, 2014	Vehicle positioning in tunnels	Active	417.05–435.9
[14] Wang, 2014	Vehicle positioning	Active	902–928
[15] Prinsloo, 2016	Vehicle location for IoT applications	Passive	0.125–0.134
[16] Ali, 2017	Traffic light recognition	Passive	13.56
[17] Mandal, 2011	Road traffic congestion monitoring	Active	2400
[18] Sundar, 2015	Traffic congestion control, ambulance Clearance and stolen vehicle detection	Passive	0.125
[19] Digiampaolo, 2012	Autonomous vehicle location	Passive	870
[20] Hoffman, 2015	Vehicle identification	Passive	920–923
[21] Larionov, 2017	Automatic vehicle identification	Passive	860–960
[22] Park, 2013	Recognition of vehicle position	Passive	917–923.5
[23] Wang, 2017	Vehicle identification	Passive	910–920

In particular, RFID technology has been proposed to traffic sign detection in the last decade [9–12,24], as part of the new-generation driving-aid systems. Specifically, [9] presents an advanced driver-assistance system (ADAS) in which in-pavement passive RFID tags transmit information about the road conditions (speed limits, curve warnings, ...) to the passing vehicles, which can automatically adapt their speed in response. However, since the tags are placed on the pavement, not on the traffic signs, this system is not appropriate for the intended inventory purposes. The experimental assessment of [9] confirms that the tags can be only detected at a short distance, achieving a maximum communication range of 40 cm, and the system limits the speed of the cars to 20 Km/h. An improved version of [9], which reduces the number of RFID tags required to work by a more elaborated encoding mechanism, has been presented in [24]. Furthermore, active RFID technology has been proposed

in [10–12] to increase the transmission range on ADAS systems. Contributions [11,12] propose the attachment of active RFID tags at the traffic signs as part of high-accuracy vehicle speed-controller systems, which warn the driver of the proximity of speed limit traffic signs and at intersections and other critical points in the city. Specifically in [12], active tags are used to ensure their detection from a distance large enough to permit the operation of a car's speed fuzzy logic controller. The system shows a good performance at low driving speeds (less than 24 Km/h). An additional feature of [12] is the use of two independent RFID readers, which reduce the occurrence of occasional missed tag detections in comparison to the case of employing only one reader. A more exhaustive comparison with [9–12,24] will be presented in Section 5, from the obtained experimental results. Active RFID has also been tested in vehicular routing applications as a substitute for GPS when the reception of GPS signals is not possible [13,14]. In these approaches, RFID tags are arranged in the road or on both sides of a tunnel's edges, and vehicle location techniques based on the received RFID signal strengths are presented. Specifically, GPS errors are more common in dense urban areas, requiring complex positioning algorithms to achieve an effective position triangulation [25]. Finally, the growing interest in addressing the challenges of the internet-of-things (IoT) [15,26] and infrastructure-to-vehicle (I2V) communication systems [27,28] brings us to the conclusion that embedding RFID technology in road facilities is likely to become a reality in the near future [28].

Based on the experimental data reported in previous works, such as [10–14], we can be confident in that active RFID technology ensures a high coverage range even if the reader is placed in a vehicle that runs at high speed, thus fulfilling the potential requirements for a traffic sign inventory system. Nevertheless, the advantages of using a RFID-based architecture would be even more pronounced if passive, not active, RFID were used, as maintenance costs would be greatly reduced in that case (passive RFID does not require battery replacement) and the price per passive tag is insignificant compared to the traffic sign's price. A more exhaustive comparison regarding costs will be detailed in Section 2.2.3.

Although there are previous works based on passive RFID for road applications [15,16,18–23], they are mainly focused on vehicle location [15,19,22] or vehicle identification [20,21,23] purposes. Vehicle location systems require placing multiple tags on the floor to accurately locate the vehicle passing over them, and vehicle identification systems require placing the reader just on the floor to identify the tag attached to the vehicle passing over the antenna. Thus, the required distance range for both applications is lower than that required for a traffic sign inventory application. Some features of these approaches will be discussed in Section 5. Additionally, other passive applications working at different frequency bands, such as [16,18], present low distance ranges (<10 cm) as well.

Therefore, some doubts may arise about the adequacy of passive RFID for the intended tasks. Its lower coverage range, which leads to short tag detection times, more noticeable when the vehicle's speed increases, may prevent the traffic signs from being identified during the normal operation of the system—even considering the recent improvements on the aforementioned limited read range of passive RFID tags [29] or on their performance on metallic environments [30,31]. As this problem has not been studied in the previous RFID-based approaches for inventory and vehicular routing applications, the aim of the present paper is to fill this gap and validate the use of passive technologies for the inventory purposes claimed. To this end, a theoretical model of the wireless communication link for in-motion scenarios is presented in this paper, and validated at both simulation and experimental levels. A preliminary version of this research was conducted in [32], where some of the functionalities and performance of the proposed system were presented. Besides the theoretical model and its validation mentioned above, this paper presents additional contributions with respect to [32], such as an experimental comparison between passive and active RFID, and the addition of location capabilities, by taking advantage of the information that can be codified in the tags. The integration of both capabilities leads to an additional improvement over several previously referenced approaches, which only provide a solution for inventory [9,10,24] or location [13,14] applications.

The paper is organized as follows: Section 2 presents a description of the proposed system and details its implementation aspects, such as RFID tag requirements, codification of their identifiers, employed software, and cost considerations. Section 3 presents a model of the wireless RFID link, which is used to study the reliability of RFID passive technologies for this application. In Section 4, the proposed system is validated at simulation level by using the model developed in the previous section, and at experimental level by describing a comparison between passive and active technologies, and validating the final on-board integrated system. In Section 5, the results are discussed from a comparison with other related works. Finally, Section 6 brings the paper to a conclusion.

2. System Description and Implementation Aspects

2.1. System Description

As mentioned before, the proposed system is based on passive RFID tags on each traffic sign and an RFID reader on the inspection vehicle. Therefore, the system requires the placement, in each traffic sign, of a little inexpensive electronic tag. This tag consists of an antenna and a microchip programmed to transmit an identification code, unique to each sign, when requested to do so. The operation of the proposed system has been summarized in Figure 1: the process starts when a reader device, installed in the traveling inspection vehicle, broadcasts requests for the tags' identifications by radio. In response, nearby traffic signs identify themselves, which enables their automatic and real-time detection. Finally, the process finishes by checking the detected tags against the original inventory in real-time, and discrepancies (e.g., the unexpected presence or absence of a traffic sign near the vehicle's location) are reported to the road maintenance company. Additionally, the RFID identifier is mapped to geo-referenced coordinates to display the exact location of the traffic signs on a map. In principle, RFID technology makes it possible to determine the presence of traffic signs behind obstacles and in all weather conditions, even at night, which enables the physical inventory to be taken at any time. In addition, it is possible to simultaneously detect and differentiate between different tags even if they are located close to each other.

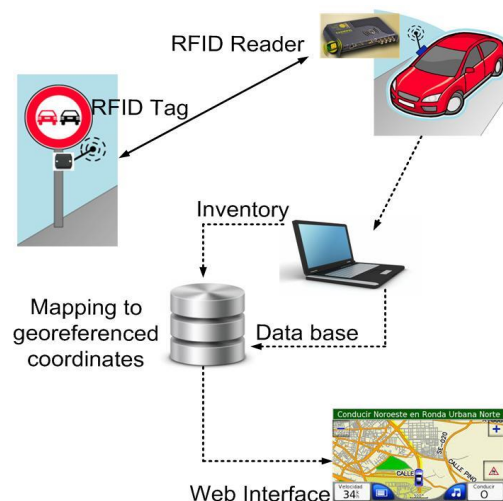


Figure 1. System overview.

Other interesting features are that: (1) tags uniquely identify each element and can therefore provide other relevant information to the reader (e.g., the location or the date of installation of the sign); (2) no infrastructure maintenance is required; and (3) the system is highly scalable: it can be applied not only to standardized traffic signs but also to any street facilities, with inventory and location purposes.

Additionally, commercial readers are usually equipped with several antenna ports so that a set of multiple connected antennas can be used to cover multiple directions. This would enable, for example,

detecting tags placed on traffic signs installed on the opposite side of the road or at the back of the signs left behind by the vehicle.

As an example of the potential offered by the system, detected traffic signs can be dynamically located on a map, so as to enable road maintenance companies to easily visualize all the traffic infrastructure. In the prototype that we have developed, electronic product code (EPC) identifiers received by the RFID reader are sent to an external computer, time-stamped, and stored on a database. Then, the traffic sign is unequivocally associated to a pair of georeferenced coordinates using the EPC frame data (whose codification is detailed in Section 2.2.1). These coordinates are used as input to display the locations of the traffic signs in a dynamically-generated map, which includes selectors and menus, providing tooltips to the map points, which give information about the inventory and location. Detected traffic signs are compared with the identifiers in the database so that all non-previously inventoried, missing, or displaced signs are easily identified. As a consequence, the information on the map can be updated automatically and in real time. The interface includes message boxes that inform about any incidences, such as a missed traffic sign, in the inventory process. These functionalities could be extended to any urban facility as well.

An example of the prototype digital map is presented in Figures 2 and 3. This map provides, at the same time, a visual support for the inventory functionalities and a low-cost, robust, and open-source alternative navigation system, which may be useful in various harsh scenarios for GPS communication, such as tunnels, underground, or very dense urban areas.



Figure 2. Spatial location of the detected signs.

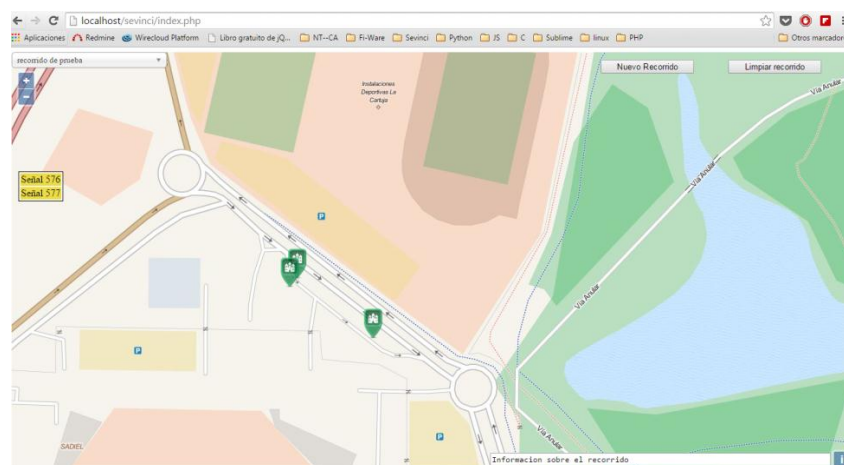


Figure 3. Map generated from the detected signs information.

2.2. Implementation Aspects

2.2.1. Tag Requirements and Data Codification

Firstly, tags must fulfill several requirements, in particular, low weight and size, suitable performance on metallic surfaces, a ruggedized package, and sufficient storage capacity for encoding different fields—such as the type of sign, road identifier, and kilometric location. These features will be detailed in Section 4.1.1, which describes the selected commercial equipment.

The implemented codification for a 96-bit EPC is described in Table 2. This encoding takes as reference the nomenclature of the Spanish roads, which are divided in stretches of 5 Km. By using this division, it is possible to implement an organized and easily upgradeable inventory.

Table 2. Codification of the EPC frame.

Field (Used Name)	Length (bits)	Description
Signal (Sg)	10	Indicates the type of signal.
Signal number (SN)	10 ¹	Identifier of the traffic sign within its stretch.
Stretch (St)	8 ²	Identifies the stretch within a road.
Road (Rd)	26 ³	Road identifier.
Kilometer (Km)	11 ⁴	Indicates the kilometric location on the road of the traffic sign.
Meter (M)	10	Indicates the distance in meters from the start of the kilometer to the traffic sign.
Installation date (InD)	10 ⁵	Indicates the date when the traffic sign was installed, in order to know if it has to be replaced.
Cyclic redundancy check (CRC)	5	Code to detect possible errors in the reception of the EPC.

¹ This length will be oversized, since it allows to code around five traffic signs per meter. ² This length is 8 bits because the longest road in Spain (named N-340) is 1248 Km long, so it is composed of 250 stretches. ³ This length is 26 bits because the usual format name for a Spanish road is composed of two letters and a three-digit number, requiring 16 bits for the letters (using an ASCII 8-bit code) and 10 bits for the number. ⁴ This length is 11 bits because the maximum length is 1248 Km. ⁵ This length is 10 bits in order to use 4 bits to codify the month and 6 bits to codify the year.

Note that 6 bits of the 96-bit EPC are left unused, so the proposed codification would enable future extensions, or even migrations to other-countries road networks. Moreover, though this codification is oriented to road inventory applications, a similar frame could be used, previous reconfiguration of the EPC, for example, to control the inventory and the location of street facilities which can be displaced, such as dumpsters, thus opening up new opportunities to develop the paradigm of smart cities [33,34]. These capabilities for updating, extensions and migrations purposes will be ease by using passive RFID technologies which employ open communication standards and, usually, longer EPC identifiers than the active RFID case, such as described in Section 4.1.1.

2.2.2. Software Architecture

The received EPC identifiers are stored on a MySQL database. By using the above described fields *St*, *Rd*, and *Km*, each EPC is unequivocally associated to a pair of georeferenced coordinates, which is employed as input of the dynamically-generated map and the web interface designed by using *PHP*, *Javascript*, and *jQuery*. The map view has been implemented by using the framework *Openlayers*, which enable access to the *OpenStreetMap* dataset. Additionally, the complement *Chosen* of *jQuery* has been used to design the selectors and menus.

2.2.3. Costs Considerations

Costs considerations lead us to propose a system based on passive RFID technology, as described in Section 1. In passive RFID, tags collect the energy required for operation from the radio-frequency signal received from the reader device. By contrast, active RFID tags have a local power source (e.g.,

a battery) so that they can transmit data farther than passive tags. However, the cost per active RFID tag (around US\$20–25 in the time of writing) is also much higher than that in the passive case (about US\$3 for a ruggedized passive tag designed to work over metallic surfaces) [35,36]. Moreover, considering a price of around US\$100–350 [37] per traffic sign, the total cost should be considerably increased installing active tags in comparison with using passive technologies. This difference regarding costs is extremely important, because the final objective of this research is to implement an inventory system for all the traffic signs which compose the Spanish National Roads Network. Therefore, placing a passive tag at each traffic sign, instead of an active tag, would be saving several million US\$.

Besides the costs per tag, active technology requires batteries, which must to be replaced periodically, leading to an additional increasing maintenance costs. Additionally, active systems commonly employ proprietary communication protocols, which imply a manufacturer dependency with respect to future improvements of the system. At this point, these factors clearly tip the balance in favor of passive tags. Therefore, the following sections will describe the validation of the selected technology at theoretical, simulation, and experimental levels.

3. RFID Link Budget Calculation

The operation of the proposed system involves passive RFID tag readings at a maximum distance and at high speed of the vehicle inspection. To theoretically validate this idea, in this section we present a reliable radio wave propagation model that can be used to estimate the maximum range at which the tags can be detected and determine the speed limit for the inspection vehicle. The fundamentals of the RFID link budget calculation can be found in [38] for static applications. In addition, simple models have been used in the related papers [12,13] to calculate the RFID coverage range in roads. Specifically, [13] proposes an unobstructed free-space model for estimating the signal strength received from the RFID tags. A slightly more sophisticated approach is used in [12], which takes into consideration the possible interference caused by the reflection on the ground of the radiowaves. This approach serves to conclude that both the reader and the RFID tags should be as high above the ground as possible. Although not explicitly stated, a basic assumption in the propagation models in [12,13] is again that both the reader and the RFID tags are static, without movement. The contribution of this section is to generalize previous approaches in [12,13,38] by taking into account vehicle's location and speed in the equations governing the link budget. In addition, the effect of multipath interferences in complex scenarios, such as urban environments, is modeled statistically for a more accurate description of reality. Therefore, the exposition is organized as follows: a basic background on the RFID link budget calculations (for the case of the downlink communication) is given in Section 3.1.1. The extension to in-motion scenarios under real conditions is described in Section 3.1.2.

3.1. Downlink (Reader to Tag) Communication

3.1.1. Background

In general, the radiation power flux density averaged over time, or the average Poynting vector, of an electromagnetic wave is given by $\phi = e_{rms}^2/120\pi$ (W/m²), where e_{rms} is the root mean square (rms) value of the electric field [39]. The effective aperture of a receiving antenna—i.e., the area over which the antenna gathers the energy of the incoming electromagnetic waves—is shown in specialized texts [39] to be $a_{eff} = g_R \lambda^2/4\pi$ (m²), where g_R is the gain of the antenna and λ (m) is the wavelength of the wave. It holds that the mean power p_R delivered to the receiving antenna is the product of the Poynting vector at the antenna by its effective area a_{eff} .

$$p_R = \phi \cdot a_{eff} = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{e_{rms}^2}{120\pi} [W]. \quad (1)$$

For a free-space propagation scenario, the Poynting vector at a distance r (m) from a transmitter can be also calculated, for a transmission power p_T (W), as $\phi = p_T g_T/(4\pi r^2)$, where g_T is the gain of

the transmitter antenna in the direction of the receiver. By equating both expressions for ϕ , we obtain that [39]

$$e_{rms} = \frac{\sqrt{30p_T g_T}}{r} [V/m]. \quad (2)$$

Assuming, as a convenient simplification, that the dependence with time of the electric field is given by a sine or cosine function with peak amplitude $\sqrt{2}e_{rms}$, the instantaneous field at this point is given by the wave

$$e(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r} \cos(\omega_c t') [V/m], \quad (3)$$

where ω_c (rad/s) is the carrier's angular frequency. Equation (3) reflects the fact that, as the propagation of the radio-waves is not instantaneous, the field received at time t was emitted at a different and earlier instant t' . Noting that $t-t'$ is the time took by the field to propagate over the distance r , we can determine t' by the equation

$$t' + \frac{r(t')}{c} = t, \quad (4)$$

where c is the speed of light. Substituting in (3) we get

$$e(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r} \cos(\omega_c t - k_c r) [V/m], \quad (5)$$

where $k_c = \omega_c/c = 2\pi f_c/c = 2\pi/\lambda$ (rad/m) is called the 'wavenumber', and f_c (Hz) is the frequency of the wave.

3.1.2. Propagation under Real Conditions

It is reasonable to suppose that the field radiated from the vehicle mainly arrives at the RFID tag via two distinct paths: one is the direct path from the vehicle to the tag, with length r_1 , and the other, of length r_2 , is the path reflected from the surface of the ground (see Figure 4).

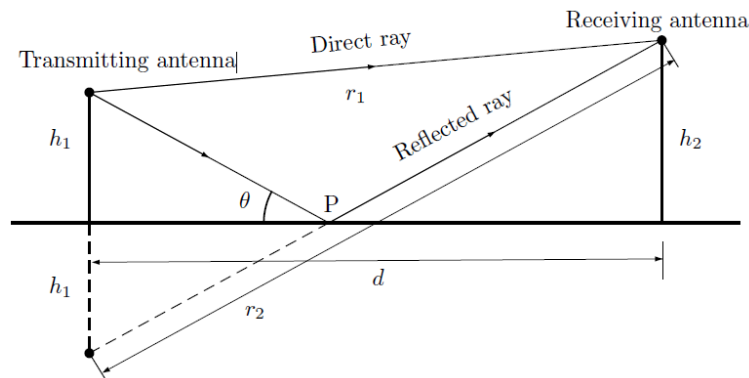


Figure 4. Propagation paths.

Invoking (5), we model the direct field at the RFID tag as

$$e_1(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r_1(t_1)} \cos(\omega_c t - k_c r_1(t_1)), \quad (6)$$

where t_1 is the time instant at which the wave received by the tag was emitted by the reader. Considering the vehicle as a point traveling at constant velocity v along a straight line, and after some tedious algebra, (4) yields

$$t_1 = t - \sqrt{(vt)^2 + (1 - (v/c)^2)(d^2 + (h_1 - h_2)^2)}/c, \quad (7)$$

where d is the distance from the traffic sign to the path followed by the car.

In the case of the ground-reflected path, a change in the amplitude and phase of the radiowave occurs on the reflection, which is given by the Fresnel coefficient $\Gamma(\theta) = \rho(\theta)e^{j\Psi}(\theta)$, where ρ stands for the amplitude attenuation and Ψ is the phase shift. Furthermore, observe that the Fresnel coefficient not only depends on the grazing angle θ but also on the field polarization. The expression of the field produced by the reflected wave is then

$$e_2(t) = \frac{\sqrt{60p_T g_T}}{r_2(t_2)} \rho \cos(\omega_c t - k_c r_2(t_2) + \Psi), \quad (8)$$

where t_2 is the time instant at which the ground-reflected wave was emitted by the vehicle and can be calculated similarly to that in (7).

In complex environments, such as urban areas, other reflected waves $e_3(t), \dots, e_N(t)$ may also reach the RFID tag. Let the n th wave be of amplitude $\alpha_n(t)$ and phase $\beta_n(t)$, i.e.,

$$e_n(t) = \alpha_n(t) \cos(\omega_c t + \beta_n(t)),$$

for $n = 3, \dots, N$. All the waves add at the receiver, leading to either constructive or destructive interference, and the resultant field is given by

$$e(t) = \sum_{n=1}^N e_n(t). \quad (9)$$

Some algebra shows that

$$e(t) = r(t) \cos(\omega_c t + \theta(t)), \quad (10)$$

where

$$r(t) = \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2}$$

$$\theta(t) = \arctan(q(t)/i(t))$$

with

$$i = a \cdot \cos(\arctan(a_2/a_1)) + \sum_{n=3}^N \alpha_n \cos(\beta_n) \quad (11a)$$

$$q = a \cdot \sin(\arctan(a_2/a_1)) + \sum_{n=3}^N \alpha_n \sin(\beta_n) \quad (11b)$$

and

$$a = \sqrt{60p_T g_T} \cdot \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{\rho^2}{r_2^2} + 2\frac{\rho}{r_1 r_2} \cos(k_c(r_2 - r_1) - \Psi)} \quad (12a)$$

$$a_1 = \frac{\cos(k_c r_1)}{r_1} + \frac{\rho \cos(\Psi - k_c r_2)}{r_2} \quad (12b)$$

$$a_2 = -\frac{\sin(k_c r_1)}{r_1} + \frac{\rho \sin(\Psi - k_c r_2)}{r_2}, \quad (12c)$$

where, for simplicity, we have dropped the dependence with time. The rms value of the field strength is given by $e_{rms} = r_{rms}/\sqrt{2}$, where r_{rms} is the rms value of $r(t)$. Then the mean received power can be calculated by (1), i.e.,

$$p_R = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{e_{rms}^2}{120\pi} = \frac{g_R \lambda^2}{4\pi} \frac{r_{rms}^2}{240\pi} [W].$$

To compute p_R , the coefficients α and β in (11) may be also determined using ray-tracing models; however, sufficient data is not expected to be available in practice so we must characterize the data

statistically. If $N \rightarrow \infty$, the central limit theorem enables us to assume that the sums $\sum_{n=1}^N \alpha_n \cos(\beta_n)$ and $\sum_{n=1}^N \alpha_n \sin(\beta_n)$ are zero-mean Gaussian variables with common variance σ^2 . Next, note that, since the wavenumber k_c is usually small (e.g., $k_c \approx 19$ at $f_c = 866$ MHz), the variation of $r(t)$ is slow in comparison with that of $\cos(\omega_c t)$ and, henceforth, in this paper we will assume that $r(t)$ is constant, i.e., $r(t) = r$, at least over the time required to complete a transaction between the vehicle and the RFID tag (which is typically on the order of a few milliseconds). Under this assumption, it follows from (11) that $r_{rms}^2 = r^2$ is the sum of the squares of two independent Gaussian variables I and Q , with means (see (11))

$$\mu_I = a \cdot \cos(\arctan(a_2/a_1))$$

and

$$\mu_Q = a \cdot \sin(\arctan(a_2/a_1)),$$

where a , a_1 and a_2 were defined in (12). Consequently, the distribution of r_{rms}^2 is non-centrally chi squared with two degrees of freedom, i.e.,

$$P(r_{rms}^2) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-(r_{rms}^2 + a^2)/2\sigma^2} I_0(a \cdot r_{rms}/\sigma^2),$$

where I_0 is the Bessel function of the first kind and zero order. Finally, using (13), the probability that the power at the RFID tag will exceed a predetermined detection threshold γ , i.e., $P(p_R \geq \gamma) = P(r_{rms}^2 \geq \gamma')$, where $\gamma' = 960\pi^2\gamma/g_R\lambda^2$, becomes

$$P(r_{rms}^2 \geq \gamma') = \int_{\gamma'}^{\infty} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-(x+a^2)/2\sigma^2} I_0(a \cdot \sqrt{x}/\sigma^2) dx = Q\left(\frac{a}{\sigma}, \frac{\sqrt{\gamma'}}{\sigma}\right), \quad (13)$$

where $Q(\cdot)$ is the Marcum Q function [40]. Observe that Equation (14) gives the probability that the link will be available through the whole time interval.

3.2. Uplink (Tag to Reader) Communication

If the power received by the RFID tag is higher than the predefined threshold, the tag absorbs and re-emits a fraction η of this power. As defined in the ISO/IEC 18000 family of international standards, the tag will usually employ FM0 or Miller baseband encoding techniques, as well as ASK or PSK modulation schemes, to transmit the information. The procedure to calculate the power received by the reader in the vehicle is essentially the same described in the previous section.

The presented model has been used to evaluate the reliability of the radio-link between the vehicle's reader and the RFID tag and it will be validated at simulation level in Section 4.2 and experimentally in Section 4.3, by adjusting the design parameters to the real application.

4. System Validation

4.1. Experimental Comparison between Passive and Active Technologies

This section describes several preliminary experimental tests with the objective to present a comparison between passive and active technologies, considering the latter as the gold standard or the technology that produces the best results (though at a much higher cost). Therefore, once we have proposed the use of passive RFID, the objective of this Section 4.1 is to validate this choice by performing similar tests to both technologies, with the objective to corroborate that, although active RFID should provide better performance (regarding coverage range or anti-collision response), using passive RFID is still possible to meet the requirements for this application, exploiting the benefits inherent to this technology. Thus, this section is organized as follows: Section 4.1.1 describes the selected equipment for both technologies, Section 4.1.2 details the performed experiments and, finally,

Section 4.1.3 provides some preliminary conclusions regarding the convenience of using passive RFID, which will be corroborated later for in-motion scenarios at simulation (Section 4.2) and experimental (Section 4.3) levels.

4.1.1. Equipment

(a) Passive components

The passive tag selected for the experiments is the Class 1 Gen 2 UHF of Confidex Ironside, which employs EPC Global 1G2 ISO 18000-6C as air-interface protocol. This tag was selected due to some features such as a low weight (22 g), enough read range on metal surfaces (up to 9 m), ruggedized package (for outdoor applications), and IP68 classification. Moreover, the tag dimensions ($51.5 \times 47.5 \times 10 \text{ mm}^3$) seem convenient for its applicability in metal surfaces, due to larger tags usually presenting a better performance in near metal environments [41], without being large enough to interfere in the visualization of the traffic sign. In addition, a critical feature of this tag is its EPC memory capacity (96–240 bits), which is necessary in order to employ this identifier for inventory and location purposes as explained in Section 2.2.1.

The selected RFID reader is the R4300P ION of CAEN RFID. Its frequency range is 902–928 MHz (FCC part 15) and 865.5–867.6 MHz (ETSI EN 302–208), using the same air-interface protocol (EPC Global 1G2 ISO 18000-6C) and a RF power up to 32 dBm (1.6 W). Besides, we use a linearly polarized antenna connected to the RFID reader, with a gain of 8 dBi, a frequency range of 860–970 MHz, VSWR (voltage standing wave ratio) $< 1.5:1$, and a beamwidth of $65\text{--}69^\circ$.

(b) Active components

The selected active tags are the Hussar Slim (HKRAT-NT02) and Garrison Rugged (HKRAT-RT02 and HKRAT-ZT02) models. Both of them use a replaceable lithium battery and transmits at 2.4 GHz. RF output is 0 dBm, presenting low power consumption ($16\text{--}18 \mu\text{A}$, 3 V). These active tags differ mainly in their application; HKRAT-NT02 is oriented to tracking and inventory applications, whereas Garrison tags find applications in harsh environments, such as metal and other non-RF-friendly items. Therefore, Garrison tags have a higher ruggedization level (meeting the IP65 standard), although they still provide a compact size ($78.8 \times 33.6 \times 10 \text{ mm}^2$). Additionally, the rugged tags have a longer lifetime (around three years without replacing the battery), so these tags could mean a reliable solution for this application, in the case of opting for active technologies.

The RFID reader is the model EMWF, from the manufacturer Empress, working at the 2.4 GHz band with a proprietary communication standard, as usual for RFID active equipment. This reader has a long range, about 30–50 m outdoors, a RF output power of 0 dBm, and a sensitivity of -85 dBm with an installed omnidirectional antenna without gain. Employing a GFSK modulation, this reader is able to identify more than 100 tags/readings simultaneously without collision, and transmit the collected data through the standards such as 802.11 b/g or TCP/IP.

4.1.2. Test Setup and Experimental Results

In order to compare the performance of both technologies, the test configuration shown in Figure 5 was implemented for passive and active cases.

The test setup consists of a mobile support, where the RFID tag was installed over a metallic plate ($45 \times 15 \text{ cm}^2$), and the RF antenna was connected to the RFID reader, which is controlled by a computer in order to visualize the results.

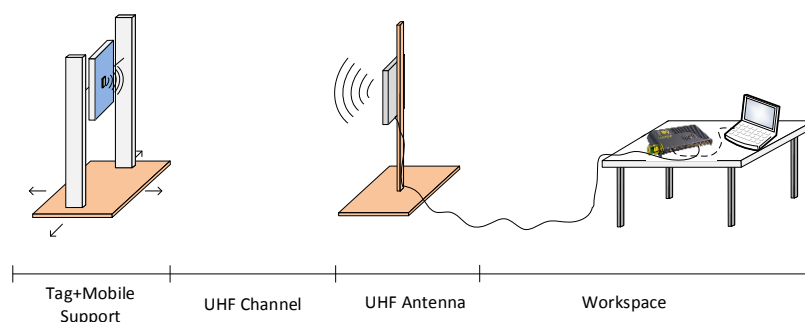


Figure 5. Test configuration.

Passive Case

(a) Maximum coverage range

From the previous experiments presented in [32], we can observe that the range in which the power received at the tag was above the theoretical sensitivity (i.e., -10 dBm) is about 7 m, for the case of placing the tag and the antenna faced and using a vertical polarization of the antenna, achieving, occasionally, a maximum distance up to 9.5 m.

(b) Multiple readings capabilities

For multiple simultaneous readings, we can observe that only one tag of five placed at the same metallic plate was detected for a distance higher than 4 m, as shown in Table 3 [32].

Table 3. Multiple readings for the passive case.

Distance (m)	Detected Tags
0.1	1, 2, 3, 4, 5
1	2, 3, 4, 5
2	2, 3, 4, 5
4	3, 4, 5
6.7	5

(c) Performance in a not faced scenario

Finally, starting from a position with the antenna and the tag initially faced and separated 7 m, the tag was displaced orthogonally to the line of sight (Figure 6), with the objective of observing the performance when it is not aligned with the reader. Under these conditions, the tag was detected for a maximum horizontal distance of 3.4 m.

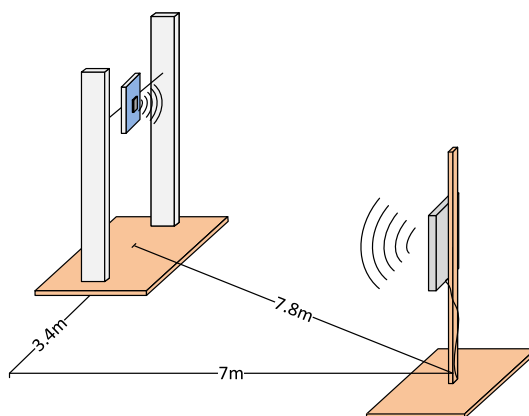


Figure 6. Maximum distance range for a non-faced passive tag.

Active Case

(a) Maximum coverage range

Previously to measure the coverage range for this technology, a preliminary test was conducted with the objective to evaluate the performance of the three active tags referenced in Section 4.1.1 (b) in a metallic environment, in order to select one of these models for the rest of the experiment and be compared with the passive case. All these active tags were detected when faced to the reader and separated by a distance of 7 m, which was the experimental range for passive case. However, the main observed difference between the three active tags is their behavior when placed on a metallic plate: the speed of reading of the NT02 model was enormously decreased on a metallic environment. Thereby, placing samples of NT02, RT02, and ZT02 at the same metallic plate, we only made two readings per scan for the NT02 tag, while we had obtained 68 readings without the plate. However, for the rugged models (RT02 and ZT02), the number of readings is much less decreased, mainly for the case of ZT02. These results are shown in Table 4.

Table 4. Readings for the active tags in a 3-s test time.

	Readings without Metallic Plate	Readings with Metallic Plate
NT02	68	2
RT02	37	26
ZT02	37	30

The next task for the active case was to measure the maximum distance range using the rugged active tags (RT02 and ZT02) over the metallic plate. The results are shown in Table 5, for a fixed tag-floor distance of 1.5 m, being possible to observe how this maximum range is pretty longer than that in the passive case, as expected.

Table 5. Maximum distance range for active tags.

Reader Antenna Distance from Floor (m)	Maximum Range for RT02 (m)	Maximum Range for ZT02 (m)
~0	25	30
0.75	28	31
1.5	30	34

(b) Multiple readings capabilities

Also from the results illustrated in Table 4, it is possible to observe how the collision problems are less accused than in the passive case (see Table 3). This effect is predictable, because manufacturers of active tags usually provide anti-collision protocols (>100 tags can be simultaneously read for the proposed tags). However, this should be not a decisive factor to select the technology since usually only one tag will be placed at each traffic sign or urban facility. In any case, even if a multiple reading is required, Table 3 shows that it is also possible to read up to three and four tags placed at the same metallic plate for a distance from the reader of 4 and 2 m, respectively, using passive technology. Moreover, as will be validated by simulation in Section 4.2, the same tag is usually read several times while the vehicle is inside its cover area, thus decreasing the impact of possible collisions over the inventory process, as will be corroborated in experimental results presented in Section 4.3, where multiple simultaneous readings are performed with the reader mounted in the vehicle.

Finally, in the best observed case (i.e., using a ZT02 tag and the antenna faced at the same height and at the maximum distance range of 30 m) the number of readings starts to decrease (<3 readings/s) when the horizontal distance between the antenna and the tag is higher than 0.8 m (using the setup of Figure 6), decreasing the efficiency of the active system in comparison to the case when the transmitter and the receiver are faced (>10 readings/s). Recall that, for the passive case, tags were detected at

horizontal distances up to 3.4 m. Therefore, taking into account that the reader installed in the car will be usually separated from the sidewalk a horizontal distance >2 m, it is possible to predict how the capabilities of the employed active RFID equipment will be not totally exploited for this application.

4.1.3. Comparative of Results: Selection of the RFID Technology

Although active RFID technologies have some important advantages, mainly a higher sensitivity which allows a longer distance range, they also have important drawbacks, such as:

- cost per tag
- need for battery replacement and higher maintenance costs
- higher probability of interference with other ISM networks
- proprietary communications protocols

By contrast, using passive technology:

- The obtained distance range (around 7 m from static experiments) seems satisfactory for inventory of traffic signs and other urban facilities, since the identifiers will be read progressively while the reader is approaching to the tag, employing a usual vehicle speed (50–100 Km/h, i.e., 14–28 m/s) and considering the theoretical data rate (40 Kbps according to the EPC Global 1G2 ISO 18000-6C [42], i.e., around 400 tags/s for the employed tag).
- A complex anti-collision protocol is not necessary, since it is possible to detect several tags placed at the same metallic plate.

Therefore, at this point, we can conclude that active technology will probably oversize the system, exceeding the reasonable application requirements with an additional higher cost, which yields passive technologies as a more convenient option for this application, since they are open-standard systems and more cost-efficient. These conclusions will be validated by the in motion test at simulation (Section 4.2) and experimental level (Section 4.3).

4.2. Simulated In-Motion Results

In this section, the feasibility of the proposed link is theoretically evaluated using the radio propagation model described in Section 3. The methodology is as follows: firstly, as a function of the location of the vehicle, we calculate the direct and reflected fields at the RFID tag using Equations (6)–(8). Secondly, using (14) we calculate the probability $P_{downlink}$ that the power received at the tag is higher than the required threshold power. Thirdly, the calculations are repeated for the uplink (tag to reader) communication and the coverage probability P_{uplink} is obtained. Finally, assuming that both the downlink and the uplink are independent events, the probability that the overall communication will be correct can be obtained by the product $P_{coverage} = P_{downlink}P_{uplink}$. In all the experiments, we consider vehicle as a point traveling at constant velocity v along a straight line. The height of the vehicle antenna from the ground is assumed to be equal to 1.3 m and the effective radiated power transmitted by the reader is set to 2 W, according to ETSI regulation EN 302–208. The sensitivity of the reader and the RFID tags are set to -80 dBm (10^{-8} mW) and -10 dBm (0.1 mW) respectively, which are realistic values for passive RFID technologies [43].

Figures 7–12 show in red line $P_{coverage}$ for different design parameters and RFID tags located at several heights of the traffic sign (1, 1.25, 1.75, and 2 m for each subfigure) from the ground. For comparison, this probability is also shown in black line for the case in which the tag and the vehicle antenna are at the same height (1.3 m).

In Figure 7, the distance from the traffic sign to the road is assumed to be $d = 2$ m, the speed of the vehicle is set to 50 Km/h and the frequency of the wave equals 866.5 MHz. Furthermore, we suppose that there is no significant multipath interference, apart from the wave reflected at the road (thus we set $\sigma = 0.1 r_{rms}$), and assume a vertical polarization, which optimizes the cover area, as described

in [32]. Note that Figure 7 has two x-axes: ‘time taken to reach the traffic sign’ (starting at $t_0 = -0.5$ s and finishing at $t = 0$) at the bottom, and ‘linear distance between the vehicle and the sign’ (with $r = d$ when $t = 0$) at the top. These axes will be used in Figures 8–12 as well. Figure 7 shows, for example, that $P_{coverage}$ starts to be close to one for about 350 ms in the case of the tag and the antenna are faced (tag height at 1.3 m), and for about 250 ms in the case of the tag is at 1 m from the ground. Results for $h = 1.25$ m are very similar to $h = 1.3$, whereas $h = 1.75$ m presents more accused notches or blind zones due to the multi-path effect. This effect has less influence at higher heights ($h = 2$ m), where the results are more similar to the ideal case (tag and antenna faced). In general, regardless of height, there is at least 250 ms with maximum $P_{coverage}$ before reaching the traffic sign. Since the usually employed RFID protocol EPC Global 1G2 ISO 18000-6C provides a data rate of 40 Kbps (i.e., 400 tags/s, so it requires about 25 ms for identifying a tag), we can ensure that the complete radio link will be reliable for the whole transaction time, and that the tag can be read about 10 times during the passage of the vehicle.

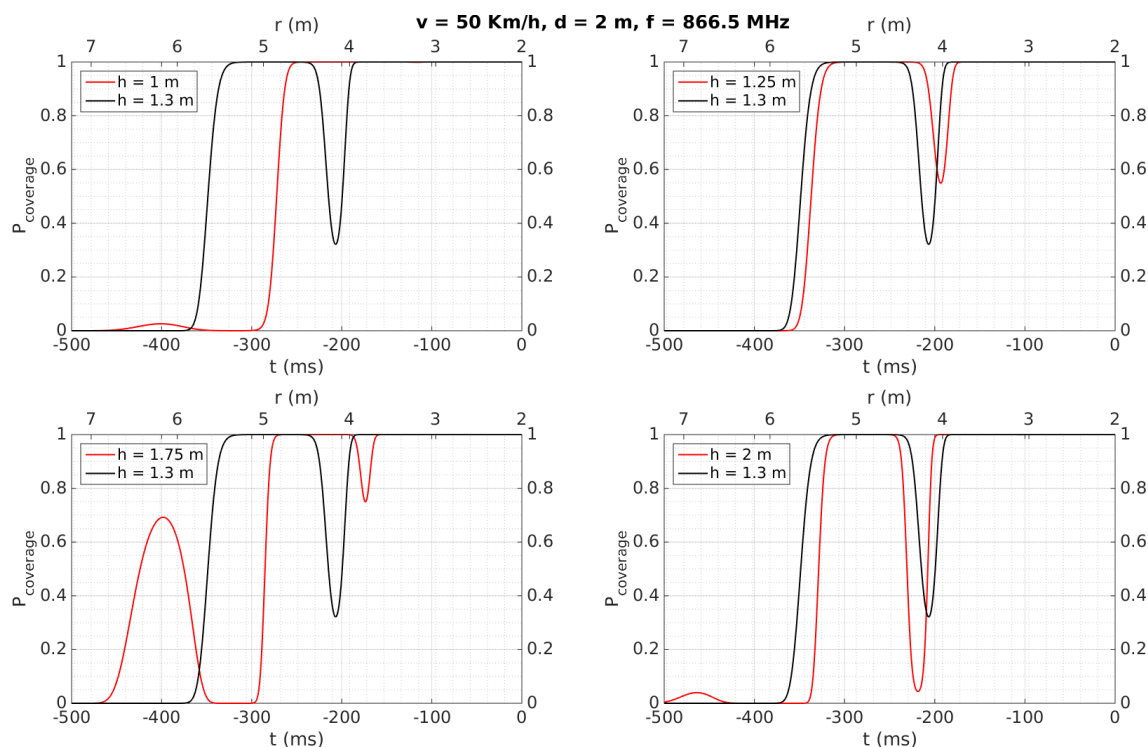


Figure 7. Simulation results: $v = 50$ Km/h, $d = 2$ m, $f = 866.5$ MHz.

Therefore, even considering a high density of tags (such as the case of an urban environment, where the facilities to be inventoried are often close to each other), this obtained performance allows to read several tags at the same cover area (around 5 m in the simulations). Additionally, due to the possible presence of several tags close to the reader, the time required for managing possible collisions has to be considered. This time leads to an additional reading time (25 ms) for each given collision [44], i.e., basically the reading process has to be repeated. Therefore, the obtained total cover time (about 250 ms, see Figure 7) may be still enough to correctly read each tag even in the case of several collisions.

Similar curves are presented in Figure 8, illustrating the case when the vehicle increases its speed up to 120 Km/h. Compared to Figure 7, it is evident that the curves are time-compressed, meaning that the period during which the link is reliable may decrease to around 100 ms. The analysis in function on the different heights is similar to the case of Figure 7. Also, from a similar analysis as described for the previous case, this time of 100 ms would allow tag identification as well.

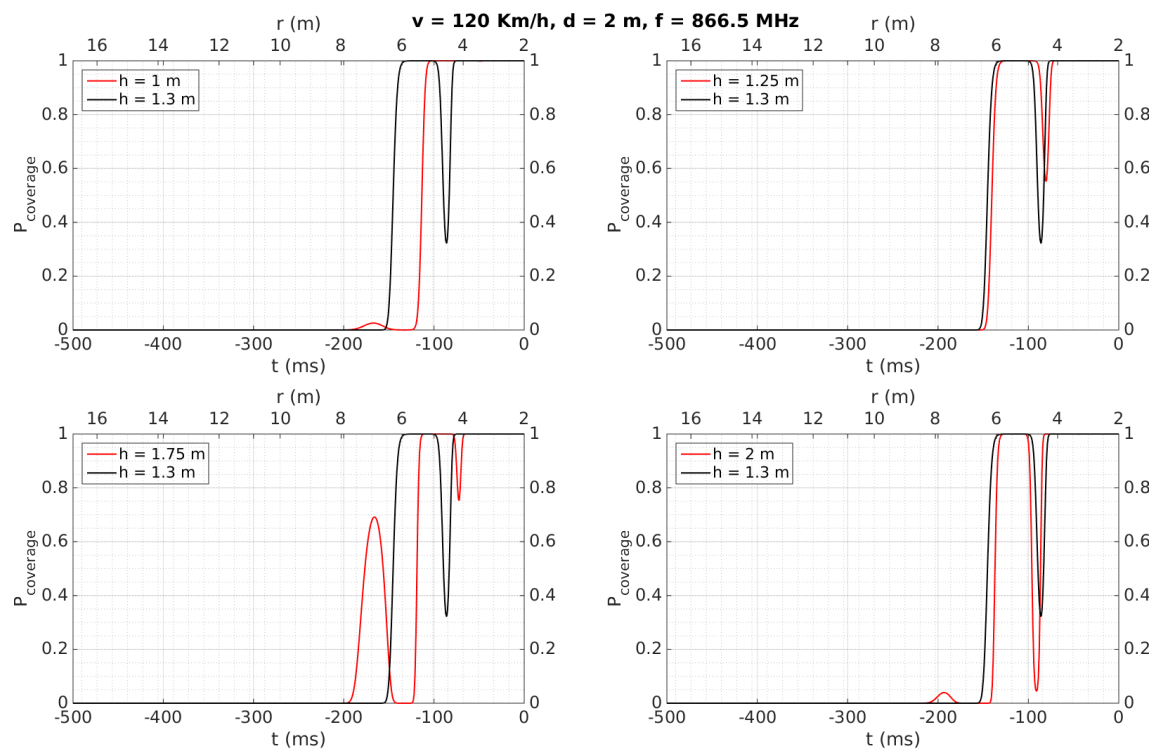


Figure 8. Simulation results: $v = 120 \text{ Km/h}$, $d = 2 \text{ m}$, $f = 866.5 \text{ MHz}$.

Cases illustrated in Figures 9 and 10 are very similar to those shown in Figures 7 and 8, respectively. The difference consists in an increase in the distance between the tag and the antenna to $d = 4 \text{ m}$, which leads to reducing the time with a $P_{\text{coverage}} \approx 1$ to 200 ms (at 50 Km/h) and <100 ms (at 120 Km/h).

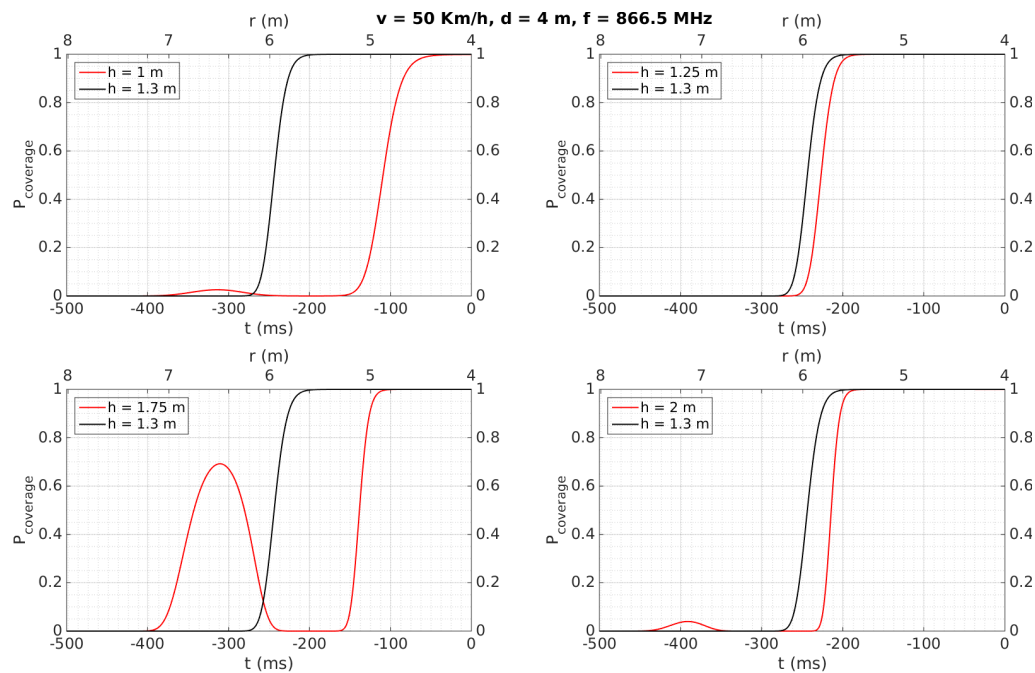


Figure 9. Simulation results: $v = 50 \text{ Km/h}$, $d = 4 \text{ m}$, $f = 866.5 \text{ MHz}$.

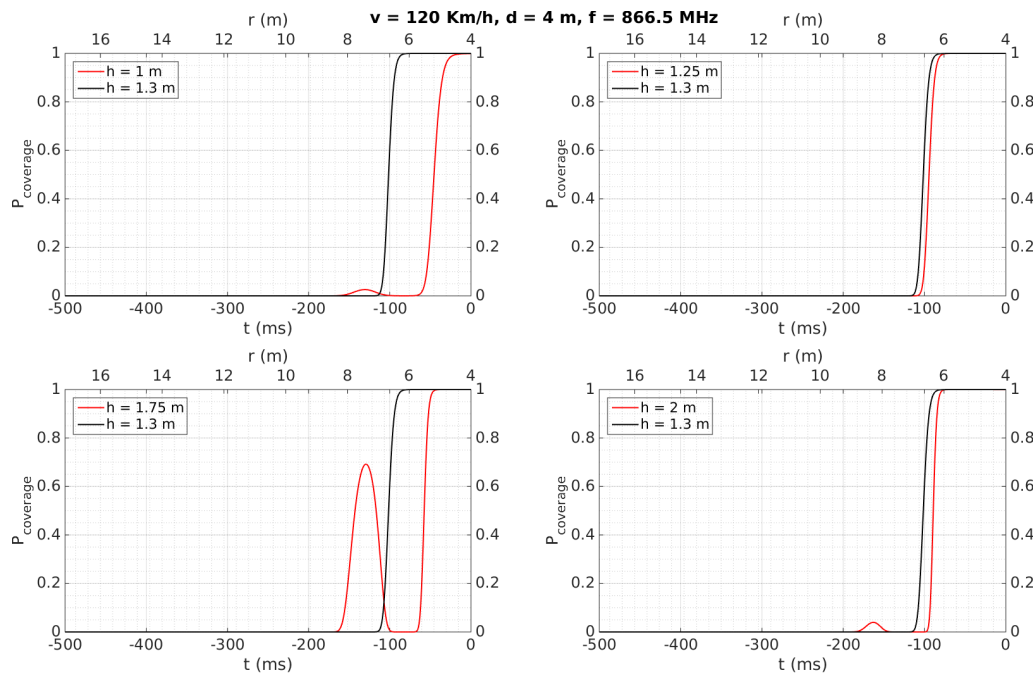


Figure 10. Simulation results: $v = 120$ Km/h, $d = 4$ m, $f = 866.5$ MHz.

Figure 11 shows the results for a severe multi-path scenario (the parameter σ is set to $\sigma = r_{rms}$), setting a speed of 50 Km/h, as an approximation of an urban environment with a high density of reflections. Even for this case, $P_{coverage}$ reaches a value close enough to one during at least 100 ms for the different studied heights, so that a correct detection is feasible even for this very harsh scenario.

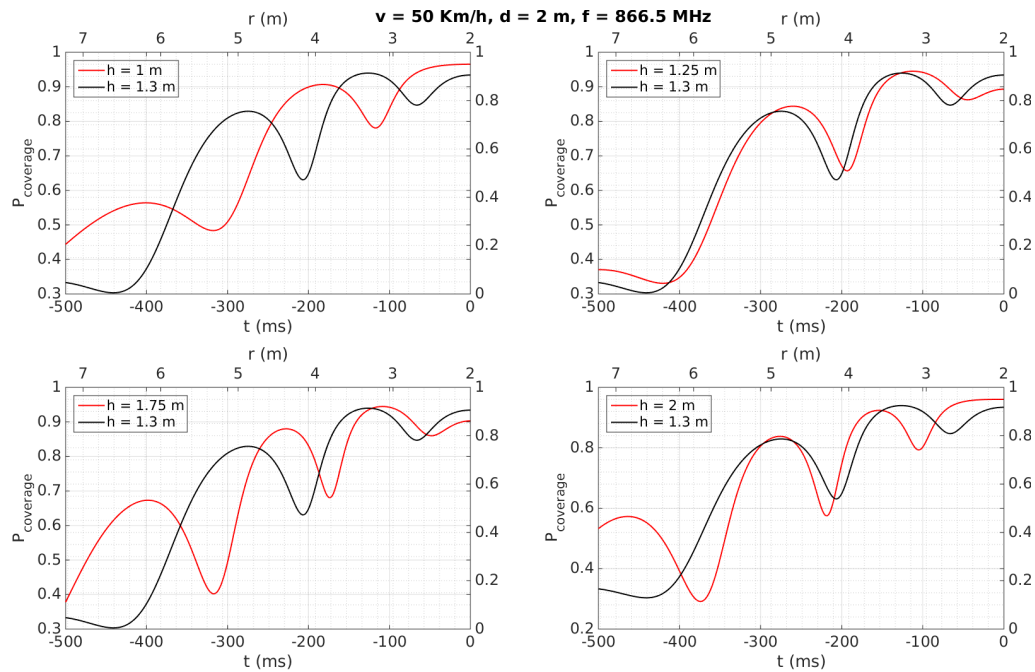


Figure 11. Simulation results: $v = 50$ Km/h, $d = 2$ m, $f = 866.5$ MHz in a severe multi-path environment.

Finally, Figure 12 shows the simulation results by using a carrier frequency of 2450 MHz and no significant multipath interference, apart from the ray reflected on the road. We observe that $P_{coverage}$ is maximum for a short time interval, in which the antenna is very close to the tag, its duration being

lower than the time of 25 ms required by the protocol. Therefore, the 866.5 MHz band is a better option by using passive technologies, whereas the 2.45 GHz band would only result feasible when active technologies are employed, whose transmission power is much higher than the passive case. Thereby, these results support the selection of the passive RFID band proposed in Section 4.1.

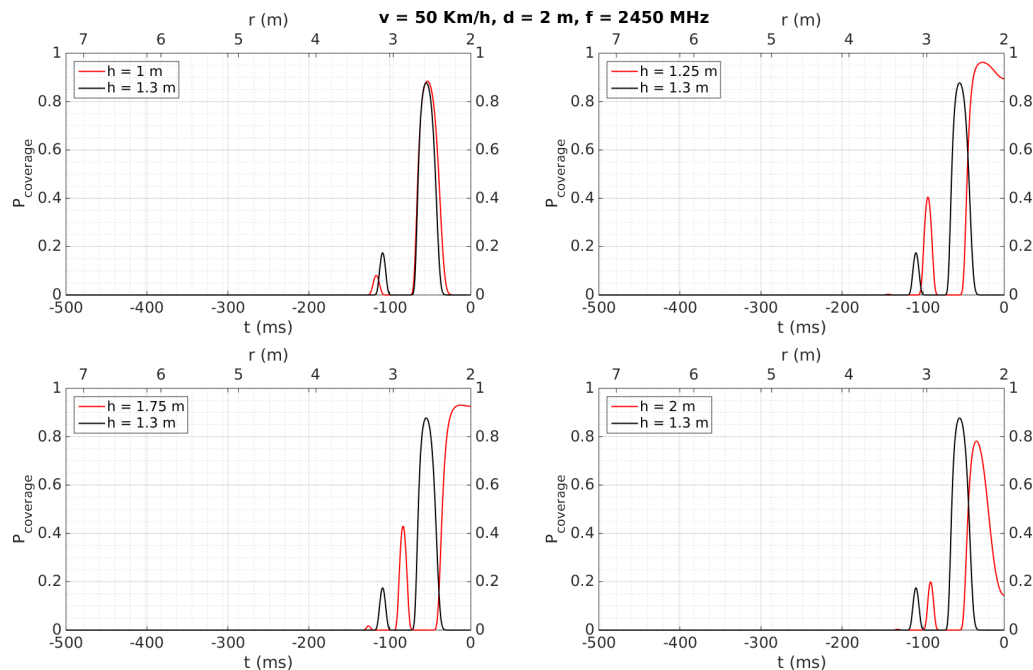


Figure 12. Simulation results: $v = 50$ Km/h, $d = 2$ m, $f = 2450$ MHz.

4.3. Experimental In-Motion Validation

In this real scenario, three passive tags are attached over a real traffic sign and its metallic pole at three different heights (1.28, 2.13, and 2.35 m, as shown in Figure 13 (left)). The reader is installed in the car, with the antenna at about 1.5 m above the floor and pointed to the traffic signs from the open window of the vehicle. In the configuration illustrated in Figure 13 (right), the distance d between the traffic sign and the antenna varies from 2 to 4 m in the experiments. Some tests were performed at different speeds, whose results are showed in Table 6 and Figure 14. It is possible to observe that the results are satisfactory at any usual speed of the car without interfering in the traffic flow, as predicted by the simulations results. Moreover, from Figure 14, we can observe a general tendency to decrease the number of detections when the speed and the distance d are increased, where the field “area type” is 1, when the tag is placed over the metallic traffic signal, or 2, when the tag is over the metallic pole.

Table 6 also shows that tags were always detected when the vehicle speed was 50 Km/h, considering a reliable detection when the tag is read at least two times. They are detected for any vehicle speed as well when they are placed over the traffic sign (2.13 and 2.35 m), instead of being placed over the metallic pole (1.28 m), even for a distance $d = 4$, which implies the system would work properly even in the case of having to maintain a certain separation from the traffic sign, which may occur in a multi-lane road scenario. This better performance at 2.13 and 2.35 m can be mainly attributed to the fact that, at higher heights, multi-path effects have less influence and the performance is more similar to the case where the antenna and the tag are faced, as was observed in Section 4.2 for the simulation results for $h = 2$ m. Moreover, the performance is worse when the tags’ heights are lower than the antenna’s height, which was also observed in the simulation results illustrated in Figures 7–12 for $h = 1$ m, where a higher time is required to reach $P_{coverage} = 1$, with this being more critical drawback at higher speeds.

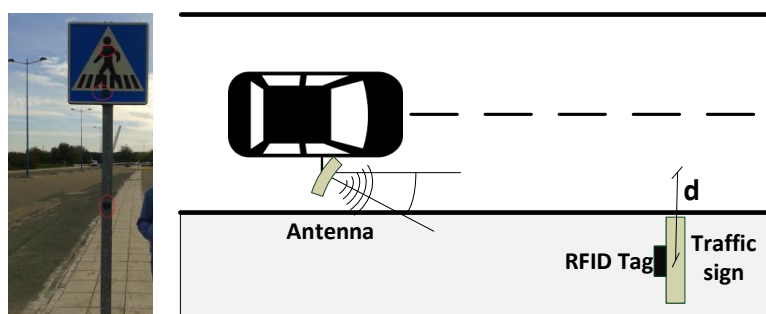


Figure 13. Tags over the traffic sign (left) and configuration setup (right).

Table 6. In-motion results.

Speed (Km/h)	Distance d (m)	Height (m)	Detection	Number of Detections
50	2	1.28	Yes	2
50	4	1.28	Yes	2
50	2	2.13	Yes	3
50	4	2.13	Yes	3
50	2	2.35	Yes	4
50	4	2.35	Yes	3
65	2	1.28	No	1
65	4	1.28	No	0
65	2	2.13	Yes	3
65	4	2.13	Yes	2
65	2	2.35	Yes	3
65	4	2.35	Yes	3
80	2	1.28	No	0
80	4	1.28	No	0
80	2	2.13	Yes	3
80	4	2.13	Yes	2
80	2	2.35	Yes	2
80	4	2.35	Yes	2

Besides the effect of placing the tags at higher heights, another reason to explain this better performance at 2.13 and 2.35 m is that these tags are placed over the traffic sign, whose area is wider than that of the metallic pole, thus increasing the original ground plane of the RFID tag and improving the performance of its antenna [45].

Note that tags may be also identified attached to urban facilities with small back-placed metal plates, since the performance is satisfactory in the most similar cases in Table 6, i.e., when the speed is limited at its maximum for these urban environments (50 Km/h) and the tags are attached to the smallest metallic surface (height of 1.28 m). Also, the obtained results can be extended to the inventory of other urban facilities with several tags placed very close, since all of them are detected in any case at 50 Km/h, as predicted in Section 4.2, leading to a reliable system for the applications where nearby items have to be detected without collision problems.

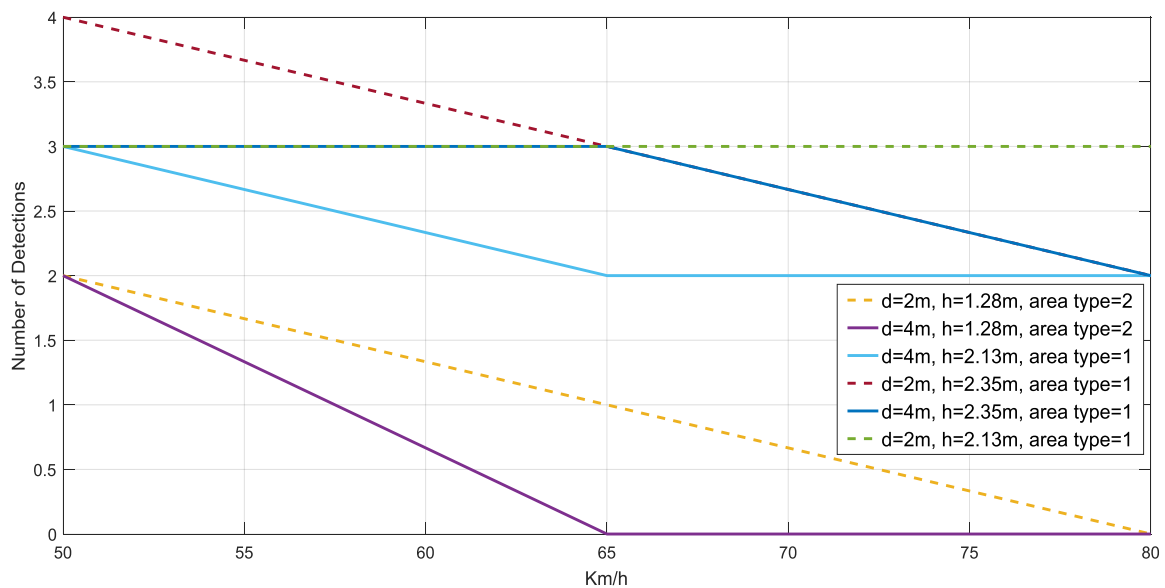


Figure 14. Number of detections for each studied case.

5. Discussion: Comparison with Related Works

A comparison with the similar works [9–12,24] referenced in Section 1 is detailed in Table 7. To the best of our knowledge, these approaches are the most related to that proposed in this paper in terms of their applications. Having said that, we observe that some of their features (e.g., the frequency band or the selected technology, active RFID in most cases) are clearly distinct from those proposed in the present paper. Therefore, Table 7 is focused on highlighting how employing the selected technology, band, and equipment is possible to meet the requirements for the intended inventory-making application, with some benefits (such as costs) over the similar previously presented approaches. First of all, note that we present a system dedicated to inventory and location purposes, whereas that [9,10,24] propose ADAS implementations to display digital sign traffics, and [11,12] proposes the attachment of RFID tags at traffic signs as part of a high accuracy vehicle speed controller system.

Table 7. Comparison between traffic signs detection systems based on RFID.

	[9]	[10]	[11]	[12]	This Work
Type	Passive	Active	Active	Active	Passive
Application	In-vehicle traffic signing	In-vehicle traffic signing	Traffic sign alert system	Intelligent speed controller	Inventory and location
Carrier frequency (MHz)	13.56	2400–2483	867	433	866.5
On average read range (meters)	0.4	30	10	23	7 ¹
Speed of the car (Km/h)	<20	<100	<90	<24	<80 ²
Tag ID capacity (bits)	64	24	192	-	96
Price/tag (US\$)	1.31	-	20	10–20	3.3
Maximum reading rate (Tags/s)	50 ³	10 ³	-	-	400 ³
Data rate (Kbps)	3.2	250	-	-	40
Tag area (mm × mm)	76 × 45	-	80 × 40	123 × 80	51.5 × 47.5

¹ Experimental maximum distance range from the static experiments reported in Section 4.1.2. For simulations, the distance range with $P_{coverage} = 1$ is 5 m approximately. ² For the case of attaching the tag over the traffic sign. When the tag is placed over the pole of the traffic sign, at a lower height, the speed is limited to 50 Km/h.

³ These values are the theoretical maximum rates given by the specifications.

Apart from the present work, only [9] proposes the use of passive RFID technologies. However, ref [9] is implemented by using tags with a short distance range, no ruggedized and no designed for metallic environment applications. This implies that these tags are placed at the road lane instead of on the traffic sign, unlike the others referenced works, losing the capability of detecting displacements or thefts of the traffic signs. Moreover, the tags used in [9] limit the speed of the car to 20 Km/h, which would interfere with the normal traffic flow in many cases. Finally, although the main advantage of these tags is their price, this cost difference is decreased considering that [9] employs three tags per traffic sign, whereas the others works employ one. In fact, [24] presents an improvement of the encoding proposed in [9] in order to reduce the number of tags.

Regarding the active RFID systems [10–12], it is possible to observe that the distance range achieved by the present work is lower, as expected, but still enough to detect all the traffic signs and urban facilities when using a vehicle running at a normal speed, while benefiting, at the same time, from the advantages of passive RFID technologies, such as costs, tag size, and no need for battery replacement. An additional feature of [12] is the use of two independent readers for redundancy, in order to avoid the occasional missed tags detections that may occur by using only one reader. This feature can be also implemented in our system, since the employed reader is equipped with four antenna ports that can be orientated in multiple directions. This possible future direction could be useful with the objective to detect tags placed at the back of the traffic signs left behind by the vehicle, or at the front of the traffic signs installed in the oncoming circulation roads. Moreover, this extension would help avoid a possible limitation of the proposed system regarding occasional occlusions of the line of sight by metallic elements, which could happen, for example, when a truck is stopped in front of the traffic sign. Other future direction related with the use of several antennas is to validate the system for traffic signs placed over the highways, which is a scenario that has not been experimentally tested yet. However, note that the tags in this scenario would be placed at higher heights, so the effects of multi-path propagation are expected to be not significant. Moreover, in this case RFID tags will be placed over larger metallic plates, improving the performance of its antenna. Therefore, pointing the antenna properly, a correct detection of these traffic signs is expected, since it is, a priori, a favorable scenario. Therefore, this implementation based on multiple antennas could lead to a more effective inventory process and, in general, improve the efficiency of any application such as the use of the system for navigation purposes.

Moreover, the proposed tag presents the most compact size and the higher ID capacity for most of cases, which facilitates the implementation of the inventory and location functionalities, and its extension, as a future direction, to other applications or migrations as well, for example, adapting this ID to the inventory of other urban facilities. In fact, by using the proposed work as a basis, it would be possible to implement the functionalities of [9–12,24] for smart city and advanced cruise applications, taking advantage of passive RFID technologies. In addition, note that, by using an open wireless communication standard, the features of the reader could be improved in the future with the advance of the technology, since the installed tags would still work with new technologies.

In summary, from the discussion of the data showed in Table 7, we can conclude that the feasibility of the system has been demonstrated for the intended purposes, fulfilling the requirements for the application, since the longer coverage range provided by active RFID is not necessary, so it is possible to avoid its main drawbacks regarding costs, maintenance tasks, and use of proprietary protocols. Additionally, in comparison with the passive case [9], a better performance has been obtained mainly because of the features of the selected equipment.

Finally, a similar study is detailed in Table 8, with the objective to present a comparison with other passive RFID systems working at the same frequency band and using similar versions of the wireless communication standard employed in this work, but with different road/vehicle applications [19–23]. Note that several features have been omitted for Table 8 (regarding Table 7) for different reasons:

- Tag ID capacity: this value is not provided by these papers. Only [20,23] use the maximum value given by the standard (512 bits) for the presented calculations, models, and simulations.

- Price/tag: this value is not provided, but we can assume similar prices in the case that these works employ ruggedized passive tags.
- Maximum reading and data rate: only [19] gives a value of 100 tag/s and [20] values of 62.5 tags/s and 32 Kbps. Since these values depend on the tag ID capacity and the employed standard, they have been omitted in Table 8 as well.
- Tag area: this value only is given by [22] ($98 \times 12 \text{ mm}^2$). Since all these works use the same technology, also we can assume similar areas.

Table 8. Comparison between passive UHF RFID based systems

	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]	This Work
Application	Autonomous vehicle location	Vehicle ID	Automatic vehicle ID	Recognition of vehicle position	Vehicle ID	Inventory and location
Carrier frequency (MHz)	870	923	860–960	902.75–927.25	900–920	866.5
On average read range (meters)	0.5	4	10 ¹	0.8	0.5 ²	7 ³
Speed of the car (Km/h)	<128 ¹	<300 ⁴	<90 ¹	<1.8	<100 ⁴	<80 ⁵

¹ Value given by simulations. ² Distance between the antenna on the floor and tag at the car. The theoretically calculated maximum distance range is 6 m. ³ Experimental maximum distance range from the static experiments reported in Section 4.1.2. For simulations, the distance range with $P_{coverage} = 1$ is 5 m approximately. ⁴ Value theoretically calculated or extrapolated. ⁵ For the case of attaching the tag over the traffic sign. When the tag is placed over the pole of the traffic sign, at a lower height, the speed is limited to 50 Km/h.

Regarding distance range, we can observe how the proposed work achieves a satisfactory performance comparing with the referenced works, mainly because they are focused on placing multiple tags on the floor to locate accurately the vehicle passing over them [19,22], or to identify vehicles placing the reader just on the floor to identify the tag attached to the vehicle passing over or very close to the antenna [20,21,23]. In other words, they do not have the purpose of identifying a tag relatively far from the car. Only [21], which performs an analysis at simulation level, achieves up to 10 m, with the vehicle running up to 90 Km/h. Also from theoretical calculations, [23] achieves a distance range of 6 m, which is similar to that obtained in the present work. Regarding the speed of the car, it is possible to observe how [22] achieves a very low value because this work is focused on minimizing the positioning error (<1.35 cm) of a mobile vehicle in an indoor environment, whereas [19–21,23] achieve higher speeds at theoretical and simulation levels, as described in Table 8. Note that the present work is able to detect the tags also running at 120 Km/h (see Figures 8 and 10) at simulation level, in the same order of some of these approaches. Therefore, comparing with the previously presented works using the same technology and frequency band, we can conclude that the proposed system presents, as main novelties, its use for inventory of traffic signs applications and the experimentally achieved values of distance range and speed of the car.

6. Conclusions

In this paper, we have proposed a design approach for a wireless cost-effective system based on passive RFID technologies with real-time inventory and location purposes. The proposed system targets applications such as the identification of traffic signs or urban facilities in scenarios where the visibility is reduced and, therefore, image processing based systems are not reliable. The proposed system implements a self-contained and self-updated data base, providing high scalability and low infrastructure maintenance outlays, reducing the timing and costs of the whole inventory process, and without interfering with the normal traffic flow. Additionally, exploiting the implemented inventory infrastructure, the EPC tags can be also employed to implement a low-cost and open source location and navigation system, by mapping these identifiers to georeferenced coordinates in order to present the exact location in a map by using a web interface. Since the performance of passive RFID is

not evident for the proposed in-motion application at a vehicle's speed, due to its lower coverage range, a theoretical model of the wireless communication link and tests at simulation and experimental levels have been performed in order to estimate this coverage range, the speed limits, and the emplacement of the tags at the traffic signs. These contributions have allowed to validate the selection of the RFID technology, describing the convenience of using passive tags over active tags for this application. Finally, we have presented the in-motion experimental results of the on-board system, demonstrating that the proposed approach based on passive RFID is an appealing low-cost and low-complexity alternative for inventory and location purposes on road and urban scenarios, finding application within the framework of the new generation driving-aid and infrastructure-to-vehicle systems.

Author Contributions: R.G.C. conceptualized the idea of this paper and F.M.C. provided the methodology and the guidance to the authors for this work. J.R.G.O., R.M.C., and E.H.F. analyzed, proposed, and designed the overall architecture of the RFID based inventory system. R.M.C. performed the theoretical model and the validation at simulation level. J.R.G.O. and E.H.F. performed the experimental validation. The manuscript was drafted and written by J.R.G.O. and R.M.C., and F.M.C. contributed to the final revision, which was approved by all the authors. The funding acquisition was provided by R.G.C. and F.M.C.

Funding: This research and the APC were funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under project TEC2016-80396-C2-2-R.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Carrasco, J.P.; De la Escalera, A.; Armingol, J.M. Recognition Stage for a Speed Supervisor Based on Road Sign Detection. *Sensors* **2012**, *12*, 12153–12168. [[CrossRef](#)]
2. Villalón-Sepúlveda, G.; Torres-Torriti, M.; Flores-Calero, M. Traffic Sign Detection System for Locating Road Intersections and Roundabouts: The Chilean Case. *Sensors* **2017**, *17*, 1207. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Hoang, T.M.; Baek, N.R.; Cho, S.W.; Kim, K.W.; Park, K.R. Road Lane Detection Robust to Shadows Based on a Fuzzy System Using a Visible Light Camera Sensor. *Sensors* **2017**, *17*, 2475. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Islam, K.T.; Raj, R.G. Real-Time (Vision-Based) Road Sign Recognition Using an Artificial Neural Network. *Sensors* **2017**, *17*, 853. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Yu, Y.; Li, J.; Guan, H.; Wang, C. Automated Extraction of Urban Road Facilities Using Mobile Laser Scanning Data. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2015**, *16*, 2167–2181. [[CrossRef](#)]
6. Balali, V.; Jahangiri, A.; Ghanipour Machiani, S. Multi-class US traffic signs 3D recognition and localization via image-based point cloud model using color candidate extraction and texture-based recognition. *J. Adv. Eng. Inform.* **2017**, *32*, 263–274. [[CrossRef](#)]
7. Timofte, R.; Zimmermann, K.; Van Gool, L. Multi-view traffic sign detection, recognition, and 3D localisation. *Mach. Vis. Appl.* **2014**, *25*, 633–647. [[CrossRef](#)]
8. Balali, V.; Ashouri Rad, A.; Golparvar-Fard, M. Detection, classification, and mapping of U.S. traffic signs using google street view images for roadway inventory management. *J. Vis. Eng.* **2015**, *15*, 1–18. [[CrossRef](#)]
9. Sato, Y.; Makane, K. Development and Evaluation of In-Vehicle Signing System Utilizing RFID Tags as Digital Traffic Signals. *Int. J. ITS Res.* **2006**, *4*, 53–58.
10. Măriuş, F.; Foşalău, C.; Zet, C.; Petrişor, D. Experimental Traffic Sign Detection using I2V Communication. In Proceedings of the 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Prague, Czech Republic, 3–4 July 2012; pp. 141–145. [[CrossRef](#)]
11. Paul, A.; Bharadwaj, N.; Bhat, A.S.; Shroff, S.; Seenanna, V.; Sitharam, T.G. Design and Prototype of an In-Vehicle Road Sign Delivery System using RFID. In Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications, Taipei, Taiwan, 5–8 November 2012; pp. 220–225. [[CrossRef](#)]
12. Pérez, J.; Seco, F.; Milanés, V.; Jiménez, A.; Díaz, J.C.; De Pedro, T. An RFID-based intelligent vehicle speed controller using active traffic signals. *Sensors* **2010**, *10*, 5872–5887. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Song, X.; Li, X.; Tang, W.; Zhang, W.; Li, B. A Hybrid Positioning Strategy for Vehicles in a Tunnel Based on RFID and In-Vehicle Sensors. *Sensors* **2014**, *14*, 23095–23118. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Wang, J.; Li, K. RFID-Based Vehicle Positioning and Its Applications in Connected Vehicles. *Sensors* **2014**, *14*, 4225–4238. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

15. Prinsloo, J.; Malekian, R. Accurate Vehicle Location System Using RFID, an Internet of Things Approach. *Sensors* **2016**, *16*, 825. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Ali, A.A.; Hussein, H.A. Traffic Lights System Based on RFID for Autonomous Driving Vehicle. In Proceedings of the Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT), Baghdad, Iraq, 7–9 March 2017; pp. 122–127. [[CrossRef](#)]
17. Mandal, K.; Sen, A.; Chakraborty, A.; Roy, S.; Batabyal, S.; Bandyopadhyay, S. Road Traffic Congestion Monitoring and Measurement using Active RFID and GSM Technology. In Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, USA, 5–7 October 2011; pp. 1375–1379. [[CrossRef](#)]
18. Sundar, R.; Hebbar, S.; Golla, V. Implementing Intelligent Traffic Control System for Congestion Control, Ambulance Clearance, and Stolen Vehicle Detection. *IEEE Sensors J.* **2015**, *15*, 1109–1113. [[CrossRef](#)]
19. DiGiampaolo, E.; Martinelli, V. A Passive UHF-RFID System for the Localization of an Indoor Autonomous Vehicle. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2012**, *59*, 3961–3970. [[CrossRef](#)]
20. Hoffman, A.J.; Pretorius, A.; Wang, Y. Geometry based analysis of an alternative RFID interrogator placement for electronic vehicle identification. In Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Las Palmas, Spain, 15–18 September 2015; pp. 2390–2397. [[CrossRef](#)]
21. Larionov, A.A.; Ivanov, R.E.; Vishnevsky, V.M. UHF RFID in Automatic Vehicle Identification: Analysis and Simulation. *IEEE J. Radio Freq. Identif.* **2017**, *1*, 3–12. [[CrossRef](#)]
22. Park, S.; Lee, H. Self-Recognition of Vehicle Position Using UHF Passive RFID Tags. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2013**, *60*, 226–234. [[CrossRef](#)]
23. Wang, Y.; Bialkowski, K.S.; Pretorius, A.J.; Du Plooy, A.G.; Abbosh, A.M. In-Road Microwave Sensor for Electronic Vehicle Identification and Tracking: Link Budget Analysis and Antenna Prototype. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2018**, *19*, 123–128. [[CrossRef](#)]
24. Małeck, K.; Kopaczyk, K. RFID-Based Traffic Signs Recognition System. In Proceedings of the International Conference on Transport Systems Telematics, Ustron, Poland, 23–26 October 2013; pp. 115–122. [[CrossRef](#)]
25. Song, J.-H.; Jee, G.-I. Performance Enhancement of Land Vehicle Positioning Using Multiple GPS Receivers in an Urban Area. *Sensors* **2016**, *16*, 1688. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Solic, P.; Blazevic, Z.; Skiljo, M.; Patrono, L.; Colella, R.; Rodrigues, J.J. Gen2 RFID as IoT Enabler: Characterization and Performance Improvement. *IEEE Wireless Commun.* **2017**, *24*, 33–39. [[CrossRef](#)]
27. García-Garrido, M.A.; Ocana, M.; Llorca, D.F.; Arroyo, E.; Pozuelo, J.; Gavilán, M. Complete Vision-Based Traffic Sign Recognition Supported by an I2V Communication System. *Sensors* **2012**, *12*, 1148–1169. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Cheng, W.; Wang, S.; Cheng, X. Virtual Track: Applications and Challenges of the RFID System on Roads. *IEEE Netw.* **2014**, *28*, 42–47. [[CrossRef](#)]
29. Zuffanelli, S.; Aguila, P.; Zamora, G.; Paredes, F.; Martin, F.; Bonache, J. A High-Gain Passive UHF-RFID Tag with Increased Read Range. *Sensors* **2016**, *16*, 1150. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Park, C.R.; Eom, K.H. RFID Label Tag Design for Metallic Surface Environments. *Sensors* **2011**, *11*, 938–948. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Hamani, A.; Yagoub, M.C.; Vuong, T.P.; Touhami, R. A Novel Broadband Antenna Design for UHF RFID Tags on Metallic Surface Environments. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2017**, *16*, 91–94. [[CrossRef](#)]
32. Hidalgo, E.; Munoz, F.; de Mier, A.G.; Carvajal, R.G.; Martin-Clemente, R. Wireless Inventory of Traffic Signs based on Passive RFID Technology. In Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Vienna, Austria, 10–14 November 2013; pp. 5467–5471. [[CrossRef](#)]
33. Hancke, G.P.; Hancke, G.P., Jr. The Role of Advanced Sensing in Smart Cities. *Sensors* **2013**, *13*, 393–425. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Mora, H.; Gilart-Iglesias, V.; Pérez-del Hoyo, R.; Andújar-Montoya, M.D. A Comprehensive System for Monitoring Urban Accessibility in Smart Cities. *Sensors* **2017**, *17*, 1834. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. RFID Journal. Available online: <https://www.rfidjournal.com/faq/show?85> (accessed on 5 June 2018).
36. AMI Track. Available online: <http://www.amitracks.com/2013/10/simple-cost-analysis-for-rfid-options/> (accessed on 5 June 2018).
37. DGT (Spanish General Traffic Direction) Magazine. Available online: <http://revista.dgt.es/es/reportajes/2016/02FEBRERO/0216-Asi-se-fabrica-una-senal.shtml#.WsyGZpdLfIU> (accessed on 5 June 2018).

38. Griffin, J.D.; Durgin, G.D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems. *IEEE Antennas Propag. Mag.* **2009**, *51*, 11–25. [CrossRef]
39. Balanis, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed.; Wiley: New York, NY, USA, 2016; ISBN 978-1118642061.
40. Bocus, M.Z.; Dettmann, C.; Coon, J.P. An approximation of the first order Marcum Q-function with application to network connectivity analysis. *IEEE Commun. Lett.* **2013**, *17*, 499–502. [CrossRef]
41. Aroor, S.R.; Deavours, D.D. Evaluation of the State of Passive UHF RFID: An Experimental Approach. *IEEE Syst. J.* **2007**, *1*, 168–176. [CrossRef]
42. EPCglobal. Radio-Frequency Identity Protocols, Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz–960 MHz, Version 1.2.0. Specification for RFID Air Interface. 2008. Available online: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhf1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf (accessed on 22 July 2018).
43. Dobkin, D. *The RF in RFID*, 2nd ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 2012; ISBN 978-0123945839.
44. Jin, C.; Cho, S.H.; Jeon, K.Y. Performance Evaluation of RFID EPC Gen2 Anti-collision Algorithm in AWGN Environment. In Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Harbin, China, 5–8 August 2007; pp. 2066–2070. [CrossRef]
45. Ukkonen, L.; Sydänheimo, L.; Kivikoski, M. Effects of Metallic Plate Size on the Performance of Microstrip Patch-Type Tag Antennas for Passive RFID. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **2005**, *4*, 410–413. [CrossRef]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

